KINGDOM OF BAHRAIN

Ministry of Education

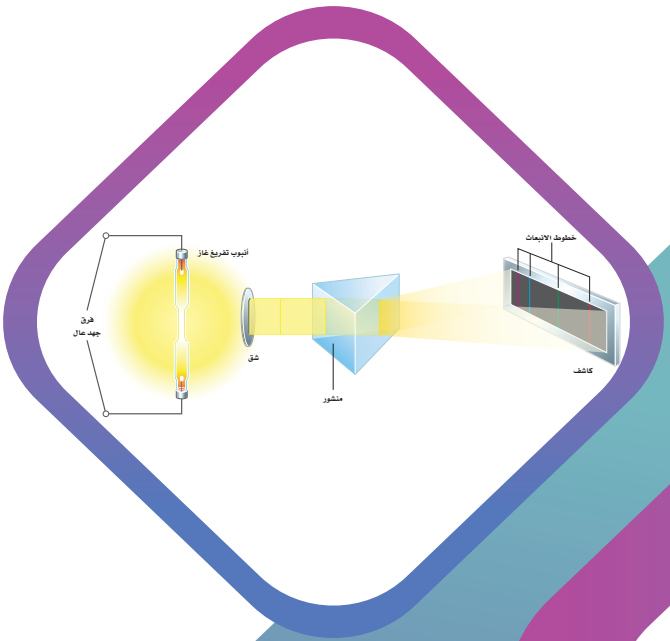
مملكة البحرين

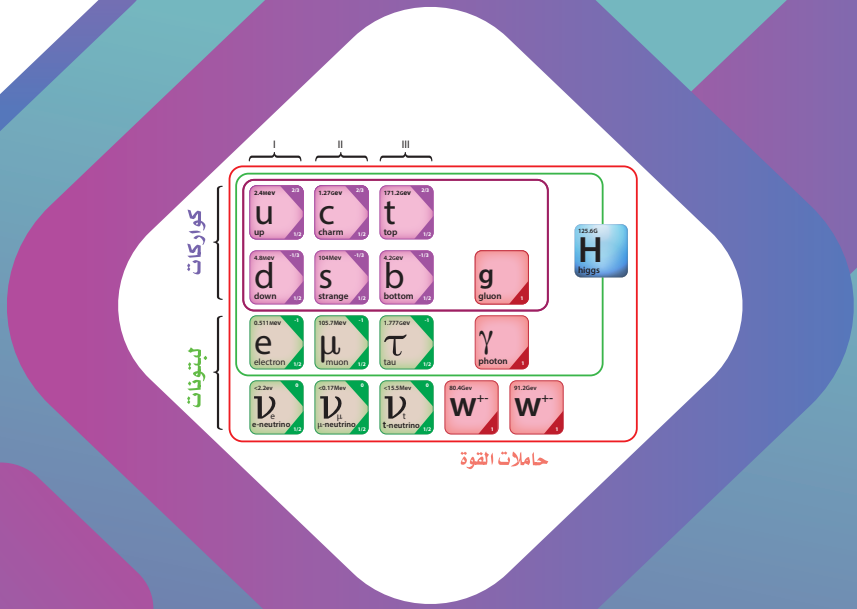
وزارة التربية والتعليم

فيز 313

الفيزياء 5

للمرحلة الثانوية





2030 البحرين BAHRAIN

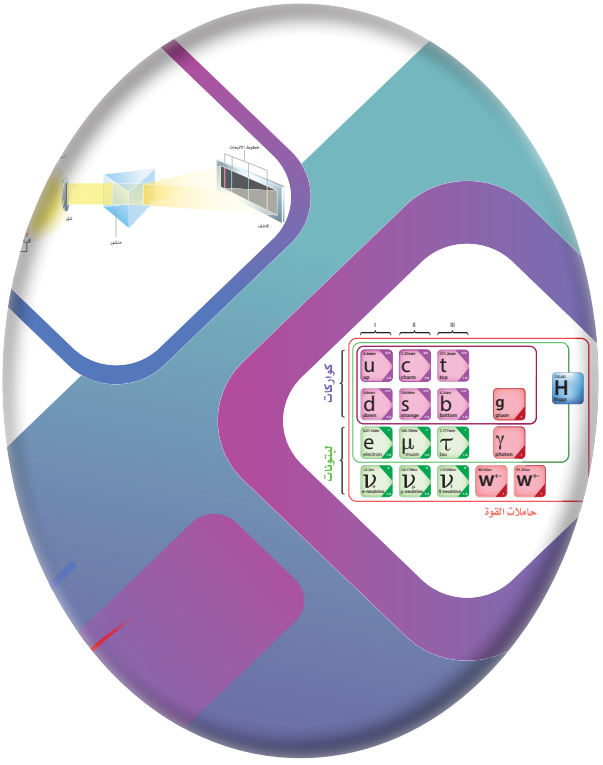
فيز313

قررت وزارة التربية والتعليم بمملكة البحرين اعتماد تدريس هذا الكتاب بمدارسها الثانوية

إدارة سياسات وتطوير المناهج

الفيزياء 5

للمرحلة الثانوية



الطبعة الثالثة
1446 هـ - 2024 م

مراجعة وتطوير

فريق متخصّص من وزارة التربية والتعليم بمملكة البحرين

www.macmillanmh.com

McGraw Hill Education

العبيكان Obeikan

حقوق الطبعة الإنجليزية محفوظة لشركة ماجروهل©، 2009م.

English Edition Copyright © 2009 the McGraw-Hill Companies, Inc.
All rights reserved.

الطبعة العربية: مجموعة العبيكان للاستثمار
وفقًا لاتفاقيتها مع شركة ماجروهل© 2008م/ 1429هـ.

Arabic Edition is published by Obeikan under agreement with
The McGraw-Hill Companies, Inc. © 2008.

لا يسمح بإعادة إصدار هذا الكتاب أو نقله في أي شكل أو واسطة، سواءً أكانت إلكترونية أو ميكانيكية، بما في ذلك التصوير بالنسخ «فوتوكوبي»، أو التسجيل، أو التخزين و الاسترجاع، دون إذن خطي من الناشر.

حضرة صاحب الجلالة الملك حمد بن عيسى آل خليفة

ملك مملكة البحرين المعظم

المقدمة

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَٰنِ الرَّحِيمِ

يأتي اهتمام مملكة البحرين بتطوير مناهج التعليم وتحديثها في إطار الخطة العامة للمملكة، وسعيها إلى مواكبة التطورات العالمية على مختلف الأصعدة.

ويأتي كتاب الفيزياء 5 للمرحلة الثانوية في إطار مشروع تطوير مناهج الرياضيات والعلوم، الذي يهدف إلى إحداث تطور نوعي في تعليم وتعلم هاتين المادتين، يكون للطالب فيه الدور الرئيس والمحوري في عمليتي التعليم والتعلّم. وقد جاء هذا الكتاب في ثلاثة فصول شملت: نظرية الكم، والذرة، والفيزياء النووية.

وقد جاء عرض محتوى الكتاب بأسلوب مشوق، وتنظيم تربوي فاعل، يعكس توجهات المنهج وفلسفته. وقد كتب بأسلوب يساعد الطالب على تنمية مهارات التحليل والتفسير والاستنتاج والتعبير، وذلك من خلال اهتمامه بالجانب التجريبي. كذلك اشتمل المحتوى على أنشطة متنوعة المستوى، تتسم بإمكانية تنفيذ الطلبة لها، وتراعي في الوقت نفسه مبدأ الفروق الفردية بينهم، بالإضافة إلى تضمينه صورًا وأشكالًا ورسومًا توضيحية معبرة تعكس طبيعة الفصل، مع حرص الكتاب على مبدأ التقويم التكويني في فصوله ودروسه المختلفة.

كما أكدت فلسفة الكتاب أهمية اكتساب الطالب المنهجية العلمية في التفكير والعمل، وتزويده بالمهارات العقلية والعملية الضرورية، ومنها: التجارب الاستهلالية، والتجارب العملية الأخرى، ومختبر الفيزياء، والإثراء، بالإضافة إلى حرصها على ربط المعرفة مع حياة الطالب، إلى جانب التكامل مع المواد الأخرى مثل: الرياضيات، واللغة، والتقنية، والمجتمع.

واللهَ نسأل أن يحقق الكتاب الأهداف المرجوة منه، وأن يوفق الجميع لما فيه خير الوطن وتقدمه وازدهاره.

قائمة المحتويات

الفصل 1

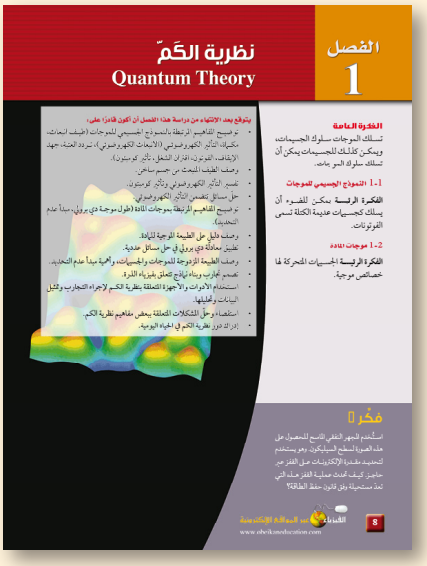
نظرية الكم 8

تجربة استهلالية 9

1–1 النموذج الجسيمي للموجات 9

1–2 موجات المادة 21

التقويم 26



الفصل 2

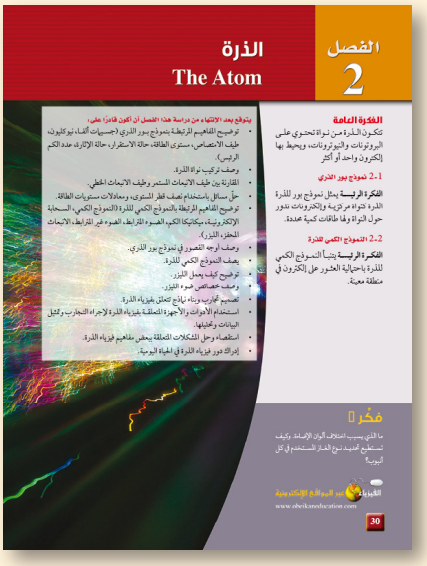
الذرة 30

تجربة استهلالية 31

2–1 نموذج بور الذري 31

2–2 النموذج الكمي للذرة 45

التقويم 54



قائمة المحتويات

الفصل 3

الفيزياء النووية 58

تجربة استهلالية 59

3–1 النواة 59

3–2 الاضمحلال النووي والتفاعلات النووية 66

3–3 وحدات بناء المادة 76

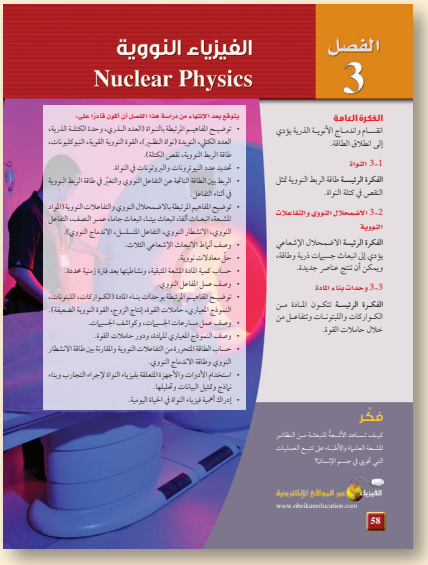
التقويم 88

دليل الرياضيات 94

الجداول 114

المصطلحات 119

الجدول الدوري للعناصر 122



الفصل 3

الفيزياء النووية
Nuclear Physics

الفكرة العامة

انقسام واندماج الأنوية الذرية يؤدي إلى انطلاق الطاقة.

3-1 النواة

الفكرة الرئيسة طاقة الربط النووية تمثل النقص في كتلة النواة.

3-2 الاضمحلال النووي والتفاعلات النووية

الفكرة الرئيسة الاضمحلال الإشعاعي يؤدي إلى انبعاث جسيمات ذرية وطاقة، ويمكن أن تنتج عناصر جديدة.

3-3 وحدات بناء المادة

الفكرة الرئيسة تتكون المادة من الكواركات واللبتونات وتتفاعل من خلال حاملات القوة.

يتوقع بعد الانتهاء من دراسة هذا الفصل أن أكون قادرًا على:

- توضيح المفاهيم المرتبطة بالنواة (العدد الذري، وحدة الكتلة الذرية، العدد الكتلي، النيوكليد، النواة الثقيلة)، القوة النووية القوية، النيوكليونات، طاقة الربط النووية، نقص الكتلة).
- تحديد عدد النيوترونات والبروتونات في النواة.
- الربط بين الطاقة الناتجة من التفاعل النووي والتغير في طاقة الربط النووية في أثناء التفاعل.
- توضيح المفاهيم المرتبطة بالاضمحلال النووي والتفاعلات النووية (المواد المشعة، انبعاث ألفا، انبعاث بيتا، انبعاث جاما، عمر النصف، التفاعل النووي، الانشطار النووي، التفاعل المتسلسل، الاندماج النووي).
- وصف أنواع الانبعاث الإشعاعي الثلاث.
- حل معادلات نووية.
- حساب كمية المادة المشعة المتبقية، ونشاطها بعد فترة زمنية محددة.
- وصف عمل المفاعل النووي.
- توضيح المفاهيم المرتبطة بوحدات بناء المادة (الكواركات، اللبتونات، النموذج المعياري، حاملات القوة، إنتاج الزوج، القوة النووية الضعيفة).
- وصف عمل مسرعات الجسيمات، وكواشف الجسيمات.
- وصف النموذج المعياري للمادة، ودور حاملات القوة.
- حساب الطاقة المتحررة من التفاعلات النووية والمقارنة بين طاقة الانشطار النووي وطاقة الاندماج النووي.
- استخدام الأدوات والأجهزة المتعلقة بفيزياء النواة لإجراء التجارب وبناء نماذج وتمثيل البيانات وتحليلها.
- إدراك أهمية فيزياء النواة في الحياة اليومية.

فكّر

كيف تساعد الأشعة المنبعثة من النظائر المشعة العلماء والأطباء على تتبع العمليات التي تجري في جسم الإنسان؟

الفيزياء عبر المواقع الإلكترونية
www.obeikandeducation.com

58

الفصل 1

نظرية الكَمّ
Quantum Theory

يتوقع بعد الإنتهاء من دراسة هذا الفصل أن أكون قادرًا على:

- توضيح المفاهيم المرتبطة بالنموذج الجسيمي للموجات (طيف انبعاث، مكماة، التأثير الكهروضوئي (الانبعاث الكهروضوئي)، تردد العتبة، جهد الإيقاف، الفوتون، اقتران الشغل، تأثير كومبتون).
- وصف الطيف المنبعث من جسم ساخن.
- تفسير التأثير الكهروضوئي وتأثير كومبتون.
- حلّ مسائل تتضمن التأثير الكهروضوئي.
- توضيح المفاهيم المرتبطة بموجات المادة (طول موجة دي برولي، مبدأ عدم التحديد).
- وصف دليلٍ على الطبيعة الموجية للمادة.
- تطبيق معادلة دي برولي في حل مسائل عددية.
- وصف الطبيعة المزدوجة للموجات والجسيمات، وأهمية مبدأ عدم التحديد.
- تصميم تجارب وبناء نماذج تتعلق بفيزياء الذرة.
- استخدام الأدوات والأجهزة المتعلقة بنظرية الكم لإجراء التجارب وتمثيل البيانات وتحليلها.
- استقصاء وحلّ المشكلات المتعلقة ببعض مفاهيم نظرية الكم.
- إدراك دور نظرية الكم في الحياة اليومية.

الفكرة العامة

تسلك الموجات سلوك الجسيمات، ويمكن كذلك للجسيمات أن تسلك سلوك الموجات.

1-1 النموذج الجسيمي للموجات

الفكرة الرئيسة يمكن للضوء أن يسلك كجسيمات عديمة الكتلة تسمى الفوتونات.

1-2 موجات المادة

الفكرة الرئيسة الجسيمات المتحركة لها خصائص موجية.

فكِّر

استُخدم المجهر النفقي الماسح للحصول على هذه الصورة لسطح السيليكون. وهو يستخدم لتحديد مقدرة الإلكترونات على القفز عبر حاجز. كيف تحدث عملية القفز هذه التي تعدّ مستحيلة وفق قانون حفظ الطاقة؟

تجربة استهلالية

ماذا يشبه طيف المصباح الكهربائي المتوهّج؟

سؤال التجربة ما ألوان الضوء المرئي المنبعثة من مصباح كهربائي متوهج وساطع؟

الخطوات

1. ثبت المصباح الكهربائي المتوهج في قاعدته.
2. صل المصباح مع مصدر جهد كهربائي يمكن التحكم فيه بمفتاح تحكم، وأضئ المصباح بحيث يصدر ضوءًا خافتًا. **تحذير: تجنب لمس المصباح المتوهج؛ لأنه يؤدي إلى إحداث حروق عندما يكون ساخنًا.**
3. أطفئ المصابيح الأخرى في الغرفة الصفية أو اجعل إضاءتها خافتة.
4. قف على بُعد 1–2 m من المصباح الكهربائي، وأمسك بمحزوز حيود هولوجرافي، بحيث يكون قريبًا من عينك، وشاهد المصباح من خلاله. **تحذير: لا تنظر مباشرة إلى المصباح الكهربائي الساطع دون استخدام محزوز الحيود؛ لأن ذلك يؤدي إلى إلحاق الأذى بقدرتك على الرؤية.**
5. **أنشئ رسومًا توضيحية علمية واستخدمها** استعمل أقلام ملونة لعمل رسم توضيحي لما تشاهده.
6. أدِرْ مفتاح التحكم لزيادة سطوع المصباح الكهربائي إلى حدّه الأقصى.
7. **أنشئ رسومًا توضيحية علمية واستخدمها** استعمل أقلام ملونة لعمل رسم توضيحي لما تشاهده.

التحليل

صف الطيف المنبعث من المصباح الكهربائي. هل هو متصل أم سلسلة من الخطوط الملونة والمميّزة؟ صف كيف يتغير الطيف المشاهد عندما يزداد سطوع المصباح.

التفكير الناقد ما مصدر الضوء المنبعث من المصباح؟ ماذا يحدث لدرجة حرارة فتيلة المصباح عندما يزداد سطوع المصباح الكهربائي؟

1–1 النموذج الجسيمي للموجات
A Particle Model of Waves

الفيزياء في حياتك:

أحد الأمثلة التطبيقية للطبيعة المزدوجة للضوء هو استخدام حزم النيوترونات عالية الطاقة في علم البلورات، فعادةً ما نفكر في النيوترونات كجسيمات، ولكن في هذه الحالة يتم استخدام سلوكها الموجي للعثور على بنية المواد عبر نمط حيود النيوترونات المشابه للأشعة السينية.

تساؤلات جوهرية:

- ما خصائص الطيف المنبعث من الأجسام الساخنة؟
- ما هي ظاهرة التأثير الكهروضوئي؟
- ما هو تأثير كومبتون؟

المفردات:

- طيف الانبعاث
- التأثير الكهروضوئي (الانبعاث الكهروضوئي)
- تردد العتبة
- الفوتون
- تأثير كمبتون
- مكماة
- جهد الايقاف
- اقتران (دالة) الشغل

تم إثبات صحة نظرية الموجات الكهرومغناطيسية للعالم ماكسويل، من خلال تجارب هينرش هيرتز التي أجراها عام 1889م. وقد اعتُبر الضوء بعد ذلك موجات كهرومغناطيسية. وبدا أن جميع الظواهر البصرية – ومنها التداخل والحيود والاستقطاب – قابلة للتفسير باستخدام نظرية الموجات الكهرومغناطيسية.

ورغم ذلك، فقد بقيت بعض المشكلات لدى الفيزيائيين بحاجة إلى حل؛ لأن ما أشارت إليه نظرية ماكسويل – أن الضوء عبارة عن موجات كهرومغناطيسية محضة – لم تستطع تفسير بعض الظواهر المتعلقة بعملية امتصاص أو انبعاث الإشعاع الكهرومغناطيسي. مثل: الطيف المنبعث من جسم ساخن، وتفريغ الجسيمات المشحونة كهربائيًّا من سطح فلزي عند سقوط أشعة فوق بنفسجية عليه.

الإشعاع من الأجسام المتوهجة
Radiation from Incandescent Bodies

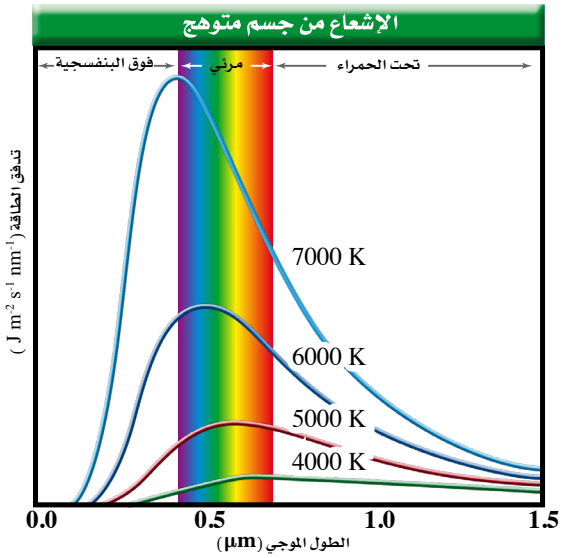
لماذا حيّر الإشعاع المنبعث من الجسم الساخن الفيزيائيين؟ لاحظ أنه يجب التعامل مع المشكلة من حيث شدة، وتردد الإشعاع المنبعث عند درجات حرارة مختلفة. لم تستطع نظرية الموجات الكهرومغناطيسية لماكسويل تفسير الإشعاعات المشاهدة المنبعثة من الأجسام الساخنة. إذن فما طبيعة الإشعاع المُنبعث من الأجسام الساخنة؟

يعدّ المصباح الكهربائي الذي شاهدته في التجربة الاستهلالية في بداية الفصل مثالاً على الجسم الساخن. وكما يتوقع بناءً على النظرية الكهرومغناطيسية، تَبعث الجسيمات المشحونة المهتزة في فتيلة المصباح الكهربائي الضوءَ المرئي والأشعة تحت الحمراء، حيث تضيء الفتيلة؛ لأنها ساخنة، ويقال إنها توهّجت، لذا يوصف المصباح الكهربائي بالمتوهّج. وتعتمد الألوان التي تراها على الشدة النسبية للموجات الكهرومغناطيسية المنبعثة ذات الترددات المختلفة، وعلى حساسية عينيك لهذه الموجات.

عندما يُستخدم مفتاح التحكم لزيادة الجهد المسلط على المصباح، فإن درجة حرارة الفتيلة المتوهجة تزداد. ونتيجة لذلك، فإن اللون يتغير من الأحمر الداكن إلى البرتقالي، ثم إلى الأصفر، وأخيرًا إلى الأبيض. ويحدث تغيّر اللون هذا لأن الفتيلة ذات درجة الحرارة الأعلى تبعث إشعاعًا بتردد أعلى (طول موجي أقل). إن الإشعاع ذا التردد الأعلى يَنتج عن التردد الأعلى للطيف المرئي (اللون البنفسجي)، وهذا يؤدي إلى أن تظهر الفتيلة بيضاء.

ماذا تتوقع أن تشاهد إذا نظرت إلى الفتيلة المتوهجة من خلال محزوز حيود؟ عندما تنظر إليها بهذه الطريقة فإنه يمكنك مشاهدة جميع ألوان قوس المطر. ويبعث المصباح في الوقت نفسه أشعة تحت حمراء وأخرى فوق بنفسجية لا يمكنك رؤيتها، ويعبر الرسم البياني لشدة الضوء المنبعث من جسم ساخن على مدى من الأطوال الموجية عن **طيف الانبعاث**، ويوضح **الشكل 1–1** أطياف الانبعاث لجسم متوهج عند درجات الحرارة 4000 K و 5000 K و 6000 K و 7000 K، لاحظ أنه عند كل درجة حرارة هناك طول موجي تنبعث عنده كمية عظمى من الطاقة. وإذا قمت بمقارنة موقع قمة كل منحنى، فستلاحظ أنه كلما ازدادت درجة الحرارة، فإن الطول الموجي الذي تنبعث عنده القيمة العظمى من الطاقة يقل.

إن القدرة الكلية المنبعثة من جسم ساخن (الطاقة المنبعثة في كل ثانية) تتناسب طرديًّا مع درجة حرارة الجسم الساخن بوحدة كلفن، مرفوعة للقوة الرابعة؛ لذا تشع الأجسام الأسخن، قدرة أكبر مقارنة بالأجسام الأبرد. وتعد الشمس من أكثر



■ **الشكل 1–1** يوضح الرسم البياني أطياف الانبعاث لجسم متوهج عند درجات حرارة مختلفة.

تجربة

التوهج في الظلام

أَسدِل الستائر، وأطفئ المصابيح في الغرفة، ثم سلّط ضوء مصباح يدوي على إناء يحتوي على مادة الفلوريسين. ضع الآن مرشّح ضوء أحمر على المصباح اليدوي لكي يسقط ضوء أحمر فقط على الإناء.

1. **صف** النتائج.
2. توقع كيف تتأثر النتائج عند استعمال مرشّح ضوء أخضر بدلاً من المرشّح الأحمر؟
3. اختبر توقعاتك.
4. فسّر النتائج.
5. توقع ما إذا كان الفلوريسين سيتوهج عند استعمال مرشح ضوء أزرق مع وضع تفسير لتوقعك.
6. **اختبر** توقعاتك.

التحليل والاستنتاج

7. **اكتب** تفسيرًا مختصرًا، تلخّص وتوضح فيه مشاهداتك.

الأمثلة شيوعًا على الأجسام الساخنة التي تشع كمية كبيرة من الطاقة؛ إذ تعد كرة كثيفة من الغازات الساخنة جدًّا والمتوهجة؛ وذلك بسبب الطاقة الناتجة عن التفاعلات النووية فيها. وتبلغ درجة حرارة سطح الشمس 5800 K، وتشع قدرة مقدارها 4×10^{26} W وهي كمية هائلة جدًّا. وفي المتوسط يستقبل كل متر مربع من سطح الأرض 1000 J من الطاقة في كل ثانية؛ أي قدرة مقدارها 1000 W، وتكون هذه الكمية كافية لإضاءة عشرة مصابيح كهربائية قدرة كل منها 100 W

الربط مع الفلك

فرضية التكميم لبلانك: تكمن المشكلة بالنسبة للنظرية الكهرومغناطيسية لماكسويل أنها غير قادرة على تفسير شكل الطيف الموضّح في **الشكل 1–1**. وقد حاول كثير من الفيزيائيين خلال الفترة 1887 و 1900م تفسير شكل هذا الطيف باستخدام النظريات الفيزيائية الكلاسيكية التي كانت موجودة آنذاك والتي تفترض أن انبعاث الطاقة يكون متصلًا، ولكنها فشلت جميعًا. وفي عام 1900م وجد الفيزيائي الألماني ماكس بلانك أن باستطاعته حساب الطيف اعتمادًا على فرضية ثورية قدّمها تنص على أن الذرات غير قادرة على تغيير طاقتها بشكل مستمر، وأن الطاقة تُشع أو تُمتص على شكل مضاعفات لكمية أساسية غير قابلة للتجزئة تتناسب مع تردد مصدر الإشعاع، وأن طاقة اهتزاز الذرات في الجسم الصلب لها ترددات محددة فقط، كما هو موضح في المعادلة التالية:

تطبيق الفيزياء

درجة حرارة الكون

الكون مليء بالإشعاع الذي بعثه عندما كان جسمًا ساخنًا جدًّا. وفي الوقت الحالي، فإن طيف الانبعاث للكون مماثل لطيف الانبعاث لجسم درجة حرارته 2.7 K، وهو بهذا يعدّ باردًا جدًّا. وكما تعلم فإن 0 K تمثل أقل درجة حرارة ممكنة في مقياس كلفن وتسمى الصفر المطلق.

طاقة الاهتزاز

طاقة الذرة المهتزة تساوي حاصل ضرب عدد صحيح في ثابت بلانك وفي تردد الاهتزاز.

$$E = nhf$$

يمثل الرمز f تردد اهتزاز الذرة، و h ثابت بلانك ومقداره 6.63×10^{-34} J/Hz، و n عدد صحيح يعرف بالعدد الكمي مثل 0 و1 و2 و3 و...

$$n = 0:\ E = (0)\ hf = 0$$
$$n = 1:\ E = (1)\ hf = hf$$
$$n = 2:\ E = (2)\ hf = 2\ hf$$
$$n = 3:\ E = (3)\ hf = 3\ hf \quad \text{وهكذا}$$

لذا فإن الطاقة E يمكن أن يكون لها المقادير hf و $2hf$ و $3hf$ ... وهكذا، ولكن لن يكون لها المقدار $\frac{2}{3}hf$ أو $\frac{3}{4}hf$، أي أن الطاقة **مكمّاة**؛ بمعنى أنها توجد فقط على شكل حزم أو كميات معينة.

واقترح بلانك أيضًا أن الذرات لا تشع دائمًا موجات كهرومغناطيسية عندما تكون في حالة اهتزاز– كما توقع ماكسويل– وإنما تبعث الذرات إشعاعًا فقط عندما تتغير طاقة اهتزازها. فإذا تغيرت طاقة اهتزاز ذرة مثلاً من $3\ hf$ إلى $2\ hf$ فإن الذرة تبعث إشعاعًا. والطاقة المنبعثة تساوي التغير في طاقة اهتزاز الذرة، وهي تساوي hf في هذه الحالة.

وجد بلانك أن الثابت h له قيمة صغيرة جدًّا، وهذا يعني أن مقادير تغير الطاقة صغيرة جدًّا، بحيث لا يمكن ملاحظتها في الأجسام العادية. وتم تكريم العالم بلانك لنظريته في تكمية الطاقة؛ وذلك بحصوله على جائزة نوبل عام 1918م ومؤخرًا صدر طابع بريدي يحمل الرمز h، كما هو موضح في **الشكل 2–1**.

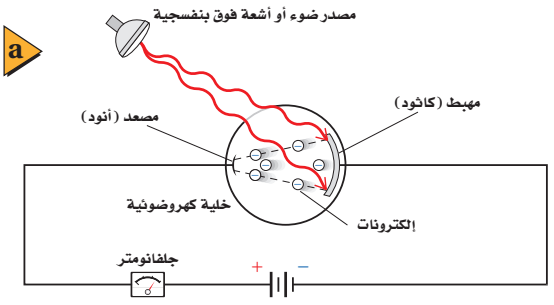
الشكل 2–1 يخلّد هذا الطابع إنجاز العالم ماكس بلانك، ويوضح إشارة الثابت h الذي يحمل اسم بلانك. ويستخدم ثابت بلانك، ومقداره 6.626×10^{-34} J/Hz في كثير من المعادلات المتعلقة بفيزياء الكم.

التأثير الكهروضوئي (الانبعاث الكهروضوئي)

The Photoelectric Effect

واجه الفيزيائيون في بداية القرن العشرين أيضًا، بعض التحديات المتعلقة ببعض النتائج العملية التي لا يمكن تفسيرها من خلال النظرية الموجية لماكسويل؛ حيث لوحظ أنه عند سقوط أشعة فوق بنفسجية على لوح زنك مشحون بشحنة سالبة، فإنه يفقد شحنته. أما عند سقوط ضوء مرئي عادي على اللوح المشحون نفسه، فإنه لا يفقد شحنته. وهذه النتيجة مناقضة للنظرية الكهرومغناطيسية؛ حيث إن كلًّا من الأشعة فوق البنفسجية والضوء المرئي يتكونان من إشعاع كهرومغناطيسي، فلماذا إذًا يفقد لوح الزنك شحنته بأحدهما، ولا يفقدها بالآخر؟ ولماذا لا يفقد لوح الزنك الموجب الشحنة شحنته بطريقة مماثلة؟ وقد بيّنت دراسات إضافية أن لوح الزنك السالب الشحنة يفقد شحنته نتيجة انبعاث أو فقد إلكترونات. ويسمى انبعاث إلكترونات عند سقوط إشعاع كهرومغناطيسي على جسم **التأثير الكهروضوئي**.

يمكن دراسة التأثير الكهروضوئي باستخدام خلية كهروضوئية، كتلك الموضحة في **الشكل 3–1**؛ حيث تحتوي الخلية على قطبين كهربائيين فلزيين في أنبوب مخلخل من الهواء ومحكم الإغلاق. بهدف منع تأكسد سطحي الفلزين، ومنع الإلكترونات من التباطؤ أو التوقف نتيجة تصادمها مع الجسيمات الموجودة في الهواء. وعادة يطلى القطب الأكبر (المهبط) المكون من صفيحة مقعرة بمادة السيزيوم، أو أي فلز قلوي آخر، في حين يصنع القطب الأصغر (المصعد) من سلك رفيع؛ لكي يحجب كمية قليلة فقط من الإشعاع. ويصنع الأنبوب عادة من الكوارتز؛ لكي يسمح للأشعة فوق البنفسجية بالنفاذ من خلاله. ويؤدي تطبيق فرق جهد موجب على القطبين (المصعد والمهبط) إلى جذب الإلكترونات في اتجاه المصعد.



عندما لا يسقط إشعاع على المهبط (القطب السالب) لا يسري تيار في الدائرة الكهربائية، لكن عندما يسقط الإشعاع عليه ينتج تيار كهربائيّ يتم قياسه بالجلفانومتر، كما هو موضح في **الشكل 3–1**. وينتج هذا التيار لأن التأثير الكهروضوئي أدّى إلى تحرير إلكترونات – تسمى أيضًا الإلكترونات الضوئية – من المهبط في اتجاه المصعد (القطب الموجب)، وتدفق الإلكترونات هذا عبارة عن تيار كهربائي في الدائرة.

تردد العتبة لا يتولد تيار كهربائي، عند سقوط أي إشعاع على المهبط، ولكن تنطلق الإلكترونات من المهبط فقط، عندما يكون تردد الإشعاع الساقط أكبر من قيمة صغرى معينة، تسمى **تردد العتبة** f_o، ويتغير تردد العتبة بتغير نوع الفلز. فمثلاً تُحرر كل الأطوال الموجية للضوء المرئي – ما عدا الضوء الأحمر – إلكترونات من السيزيوم، بينما لا يُحرر أي طول موجي للضوء المرئي إلكترونات من الزنك؛ حيث إننا نحتاج إلى الأشعة فوق البنفسجية، ذات التردد العالي لحدوث التأثير الكهروضوئي في الزنك.

■ **الشكل 3–1** في الخلية الكهروضوئية الموضحة، تتدفق الإلكترونات المحررة من المهبط إلى المصعد، ومن ثم تكتمل الدائرة الكهربائية، ويتولد تيار كهربائيّ (a). يعمل مقياس الضوء اليدوي بسبب التأثير الكهروضوئي، ويستخدمه مصورو الفوتوجرافيا لقياس مستويات الضوء (b).

يكون الإشعاع الساقط على فلز غير قادر على تحرير إلكترونات منه مهما كانت شدة هذا الإشعاع إذا كان تردده أقل من تردد العتبة. في حين يؤدي سقوط إشعاع شدته قليلة جدًّا ولكن تردده مساوٍ أو أكبر من تردد العتبة إلى تحرير إلكترونات من الفلز مباشرة. ومن الجدير بالذكر أنه عندما يكون تردد الإشعاع الساقط مساويًا أو أكبر من تردد العتبة، فإن زيادة شدة هذا الإشعاع تؤدي إلى زيادة تدفق الإلكترونات الضوئية، لأن كل فوتون يحرر إلكترون.

كيف تفسّر نظرية الموجات الكهرومغناطيسية التأثير الكهروضوئي؟ إنها غير قادرة على ذلك؛ فبناءً على هذه النظرية فالمجال الكهربائي يسرّع الإلكترونات من الفلز، وترتبط شدة المجال الكهربائي مع شدة الإشعاع (لا مع تردده). ولذلك تحتاج الإلكترونات في الفلز إلى أن تمتص طاقة من مصدر ضوء خافت فترة زمنية طويلة جدًّا قبل أن تتحرر. ولكن تبين المشاهدات أن الإلكترونات تنطلق مباشرة حتى عندما يسقط على الفلز إشعاع ذو شدة منخفضة تردده مساوٍ أو أكبر من تردد العتبة.

الفوتونات وتكمية الطاقة نشر العالم أينشتاين في عام 1905م نظرية تفسر التأثير الكهروضوئي. وبناءً على هذه النظرية، يتكون الضوء والأشكال الأخرى من الإشعاع الكهرومغناطيسي من حزم (مكماة) ومنفصلة من الطاقة، سُمّي كل منها فيما بعد **الفوتون**، وتعتمد طاقة الفوتون على تردده.

طاقة الفوتون

طاقة الفوتون تساوي حاصل ضرب ثابت بلانك في تردد الفوتون.

$$E = hf$$

تمثل f التردد بوحدة Hz، و h ثابت بلانك، ولأن $1/s = Hz$ فإن وحدة J/Hz لثابت بلانك مكافئة أيضًا للكمية J.s، ولأن وحدة الجول وحدة طاقة كبيرة جدًّا، لاستخدامها في الأنظمة ذات الحجم الذري، لذا فالوحدة الأكثر شيوعًا للطاقة هي وحدة الإلكترون فولت (eV)، ويعرّف الإلكترون فولت بأنه طاقة إلكترون يتسارع عبر فرق جهد مقداره فولت واحد.

$$1\,eV = (1.60\times10^{-19}\,C)(1\,V)$$
$$= 1.60\times10^{-19}\,C.V$$
$$= 1.60\times10^{-19}\,J$$

ويمكن إعادة كتابة معادلة طاقة الفوتون في شكل مبسّط، كما هو موضح أدناه:

طاقة الفوتون

تساوي طاقة الفوتون (eV) حاصل قسمة 1240 eV.nm على الطول الموجي للفوتون (nm).

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(1240\ eV\ .nm)}{\lambda\ (nm)}$$

توضح استراتيجيات حل المسألة في الصفحة التالية عملية اشتقاق هذه المعادلة وكيفية استخدامها.

التجربة العملية:

ما العلاقة بين لون الضوء المنبعث من الدايود المشع للضوء والهبوط في جهده؟

استراتيجيات حل المسألة

وحدات hc وطاقة الفوتون

يُزوِّدنا تحويل الكمية hc إلى وحدة eV.nm بمعادلة مبسطة يمكن أن تستخدم لحل المسائل التي تتضمن الطول الموجي للفوتون.

1. تعطى طاقة فوتون طوله الموجي λ بالمعادلة $E = hf$
2. لأن $f = c/\lambda$، فإنه يمكن كتابة هذه المعادلة على شكل $E = hc/\lambda$
3. عند استخدام المعادلة $E = hc/\lambda$، إذا كان مقدار hc بوحدة eV.nm مقسومًا على λ بوحدة nm فسوف تحصل على الطاقة بوحدة eV. لذا فإنه من المفيد أن تعلم مقدار hc بوحدة eV.nm.
4. يتم تحويل وحدة قياس hc إلى وحدة eV.nm كما يلي:

$$hc = (6.626\times10^{-34}\ \text{J/Hz})\ (2.998\times10^{8}\ \text{m/s})$$

$$\left(\frac{(1\ \text{eV})}{(1.602\times10^{-19}\ \text{J})}\right)\frac{10^{9}\ \text{nm}}{1\ \text{m}} = 1240\ \text{eV.nm}$$

5. بتعويض $hc = 1240\ \text{eV.nm}$ في معادلة طاقة الفوتون تحصل على المعادلة التالية؛ حيث λ بوحدة nm والطاقة E بوحدة eV:

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(1240\ \text{eV .nm})}{\lambda\ (\text{nm})}$$

استخدم المعادلة أعلاه لحل مسائل طاقة الفوتون عندما تكون الطاقة مطلوبة بوحدة eV.

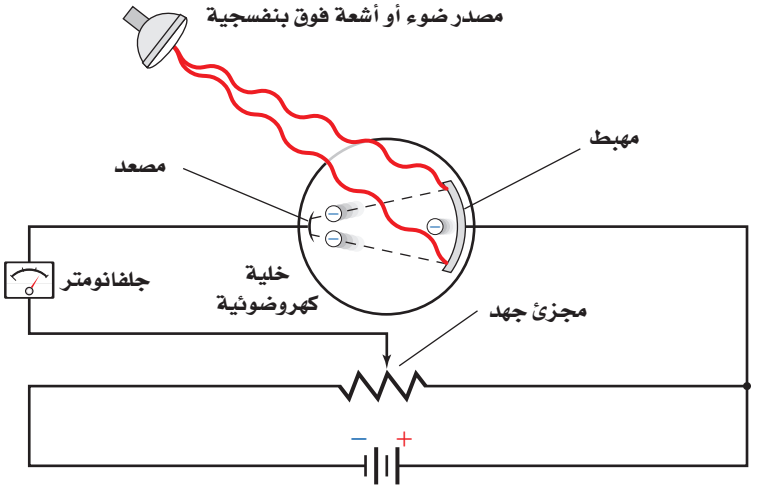
من المهم ملاحظة أن نظرية أينشتاين للفوتون أشمل وأعم من نظرية بلانك للإشعاع المنبعث من الأجسام الساخنة. فبينما توقع بلانك أن الذرات المهتزة تبعث إشعاعًا كهرومغناطيسيًّا بطاقة تساوي nhf، فإنه لم يتوقع أن الضوء والأشكال الأخرى للإشعاع الكهرومغناطيسي تسلك سلوك الجسيمات. أما نظرية أينشتاين للفوتون فتعيد تفسير نظرية بلانك للإشعاع المنبعث من الأجسام الساخنة وتوسعها.

ليتم تحرير إلكترون من سطح الفلز؛ فإننا نحتاج إلى فوتون يكون تردده على الأقل مساويًا لتردد العتبة للفلز f_0، فإذا سقط فوتون تردده أكبر أو يساوي تردد العتبة للفلز، سيتحرر إلكترون من سطح الفلز بطاقة حركية تعطى من العلاقة التالية:

الطاقة الحركية لإلكترون كهروضوئي

الطاقة الحركية للإلكترون المتحرر تساوي الفرق بين طاقة الفوتون الساقط hf، والطاقة اللازمة لتحرير الإلكترون من الفلز hf_0.

$$KE = hf - hf_0$$



■ **الشكل 4–1** يمكن قياس الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحررة من المهبط باستخدام هذا الجهاز؛ حيث يقيس الجلفانومتر التيار المار في الدائرة. وبتعديل مجزئ الجهد، يمكن للشخص الذي يجري التجربة تحديد فرق الجهد الذي يصبح عنده التيار المار في الدائرة صفرًا. عندها يمكن حساب الطاقة الحركية العظمى الممكنة للإلكترونات المتحررة.

اختبار النظرية الكهروضوئية كيف يمكن اختبار نظرية أينشتاين؟ يمكن قياس الطاقة الحركية للإلكترونات المتحررة بطريقة غير مباشرة، بوساطة جهاز خاص بذلك، كالموضح في **الشكل 4–1**. يستخدم مجزئ الجهد لتعديل فرق الجهد السالب المطبق بين قطبي الخلية الكهروضوئية، وبالتالي فإن الإلكترونات المتحررة تخسر طاقة للوصول إلى المصعد، وسيصل إليه فقط الإلكترونات المتحررة من المهبط ذات الطاقة الحركية العالية.

وكما هو موضح في **الشكل 4–1**، عند سقوط ضوء بتردد معين (أكبر من تردد العتبة) على المهبط وبزيادة سالبية جهد المصعد تدريجيًا، فإن عدد الإلكترونات التي تصل إلى المصعد يقل. وعند جهد معين لا تتمكن الإلكترونات ذات الطاقة الحركية العظمى من الوصول إلى المصعد، وعندها يتوقف التيار ويسمى هذا **جهد الإيقاف أو القطع**.

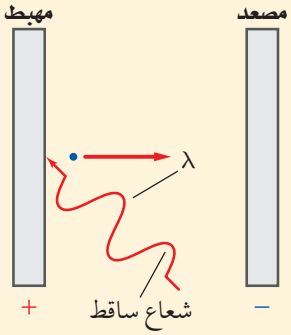
عند جهد الإيقاف تكون الطاقة الحركية للإلكترونات عند المهبط مساوية للشغل المبذول من المجال الكهربائي لإيقافها. ويعبر عن هذا بالمعادلة: $KE = -qV_0$، حيث تمثل V_0 مقدار جهد الإيقاف بوحدة الفولت (J/C)، و q شحنة الإلكترون وتساوي -1.60×10^{-19} C، لاحظ أن الإشارة السالبة في المعادلة، والمقدار السالب للشحنة q ينتجان مقدارا موجبًا للطاقة الحركية KE.

■ **الشكل 5–1** تستخدم الألواح الشمسية على هذا المبنى التأثير الكهروضوئي لتحويل ضوء الشمس إلى طاقة كهربائية.

تطبيقات يستخدم التأثير الكهروضوئي في التطبيقات اليومية المختلفة؛ فالخلايا الشمسية الموضحة في **الشكل 5–1** تستخدم التأثير الكهروضوئي، لتحويل ضوء الشمس إلى طاقة كهربائية، كما تحتوي المفاتيح الالكترونية مثل فاتحات باب الموقف (الكراج) أو المصاعد على حزم من الأشعة تحت الحمراء، تنشئ تيارًا في المستقبِل من خلال التأثير الكهروضوئي. فإذا قُطعت حزمة الضوء هذه بجسم في أثناء إغلاق باب الموقف، فإن التيار يتوقف في المستقبِل، مما يؤدي إلى فتح الباب، والتحكم في إضاءة مصابيح الشوارع وإطفائها آليًّا؛ وذلك اعتمادًا على ما إذا كان الوقت نهارًا أو ليلاً.

مثـــال 1

الطاقة الحركية لإلكترون كهروضوئي إذا كان جهد الإيقاف لخلية ضوئية معينة 4.0 V، فما مقدار الطاقة الحركية التي يُكسبها الضوء الساقط للإلكترونات المتحررة؟ عبّر عن إجابتك بوحدتي الجول والإلكترون فولت.



1 تحليل المسألة ورسمها

- ارسم المهبط والمصعد، والإشعاع الساقط، واتجاه حركة الإلكترون المتحرر.

لاحظ أن جهد الإيقاف، يحول دون تدفق الإلكترونات عبر الخلية الضوئية.

المعلوم	المجهول
$V_0 = 4.0\ \text{V}$	KE (بوحدة J و eV)=?
$q = -1.60\times10^{-19}\text{C}$	

2 إيجاد الكمية المجهولة

يبذل المجال الكهربائي شغلاً على الإلكترونات عندما يكون الشغل المبذول W يساوي سالب الطاقة الحركية الابتدائية KE فإن الإلكترونات لا تمر عبر الخلية الضوئية.

$$\text{KE} + W = 0\ \text{J}$$

حل المعادلة لحساب الطاقة الحركية KE.

$$\text{KE} = -W$$

بالتعويض عن $W = q\,V_0$

$$= -q\,V_0$$

بالتعويض عن $V_0 = 4.0\ \text{V}$، $q = -1.60\times10^{-19}\ \text{C}$

$$= -(-1.60\times10^{-19}\ \text{C})\,(4.0\ \text{V})$$

$$= +6.4\times10^{-19}\ \text{J}$$

حوّل وحدة قياس الطاقة الحركية من جول إلى إلكترون فولت

$$\text{KE} = (+6.4\times10^{-19}\text{J})\left(\frac{1\ \text{eV}}{1.60\times10^{-19}\ \text{J}}\right)$$

$$= 4.0\ \text{eV}$$

3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** الجول والإلكترون فولت كلاهما وحدات قياس للطاقة.
- **هل للإشارات معنى؟** الطاقة الحركية دائمًا موجبة.
- **هل الجواب منطقي؟** الطاقة بوحدة الإلكترون فولت تساوي في المقدار فرق جهد الإيقاف بوحدة فولت.

مسائل تدريبية

1. ما طاقة إلكترون بوحدة الجول إذا كانت طاقته 2.3 eV؟
2. إذا كانت سرعة إلكترون $6.2\times10^{6}\ \text{m/s}$، فما طاقته بوحدة الإلكترون فولت؟
3. إذا كان جهد الإيقاف لخلية كهروضوئية 5.7 V، فاحسب الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحررة بوحدة eV.
4. يلزم جهد إيقاف مقداره 3.2 V لمنع سريان التيار الكهربائي في خلية كهروضوئية. احسب الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية المتحررة بوحدة الجول.

مسألة تحدٍّ

افترض أن قطعة نقدية كتلتها 5.0 g معلقة بنابض تهتز إلى أعلى وإلى أسفل، وكانت السرعة القصوى لهذه القطعة في أثناء اهتزازها 1.0 cm /s، اعتبر أن قطعة النقد المهتزة تُنمذج الاهتزازات الكمية للإلكترونات في الذرة، حيث تعطى طاقة الاهتزازات بالمعادلة $E= nhf$

1. احسب الطاقة الحركية العظمى للجسم المهتز.
2. يبعث الجسم المهتز طاقة على شكل ضوء بتردد 5.0×10^{14} Hz إذا كانت هذه الطاقة تُبعث في مرحلة واحدة فاحسب الطاقة التي يفقدها الجسم.
3. حدد عدد المراحل التي ستقل فيها طاقة الجسم بمقادير متساوية من أجل أن يفقد طاقته كلها.

يمثل الرسم البياني طاقات حركة الإلكترونات التي تتحرر من فلز، مقابل ترددات الفوتونات الساقطة عبارة عن خط مستقيم، كما هو موضح في **الشكل 6–1**. للفلزات جميعها رسوم بيانية متشابهة لها الميل نفسه، وهذا الميل يساوي النسبة بين ارتفاع الخط المستقيم وامتداده الأفقي، والذي يساوي ثابت بلانك h.

$$\text{الميل} = \frac{\text{الرأسي}}{\text{الأفقي}} = \frac{\text{التغير في الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المحررة}}{\text{التغير في تردد الإشعاع الساقط}}$$

$$h = \frac{\Delta KE}{\Delta f}$$

تختلف الرسوم البيانية للفلزات المختلفة فقط في تردد العتبة اللازم لتحرير الإلكترونات. في **الشكل 6–1** تردد العتبة f_0 هو النقطة التي تكون عندها KE = 0. وفي هذه الحالة تقع f_0 على نقطة تقاطع الخط المستقيم مع المحور x، ويرتبط تردد العتبة مع اقتران (دالة) الشغل للفلز. **واقتران الشغل** لفلز هو الطاقة اللازمة لتحرير الإلكترون الأضعف ارتباطًا بالنواة أو بالفلز، ويرمز له بالرمز ϕ ومقداره يساوي hf_0، وتقع ϕ على نقطة تقاطع الخط المستقيم مع المحور y، وعندما يسقط فوتون تردده f_0 على فلز تكون طاقته كافية لتحرير الإلكترون فقط، دون تزويده بأي طاقة حركية.

أجرى العالم الأمريكي روبرت مليكان بين عامي 1905 و 1916م مجموعة من التجارب، حاول من خلالها أن يدحض النظرية الكهروضوئية لأينشتاين، ومع أن نتائج تجاربه أكدت صحة معادلة أينشتاين، إلا أنه لم يقبل فكرة أينشتاين عن الفوتون. وقد ساهمت تجارب مليكان في حصول أينشتاين على جائزة نوبل عام 1921م عن النظرية الكهروضوئية. وفي عام 1923م حصل مليكان أيضًا على جائزة نوبل عن تجربته لحساب شحنة الإلكترون، وعن أبحاثه في التأثير الكهروضوئي.

التجربة العملية:

كيف يمكن استعمال كرات فولاذية لنمذجة التأثير الكهروضوئي؟

الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية مقابل التردد

الشكل 6–1 يوضح الرسم البياني العلاقة بين تردد الضوء والطاقة الحركية العظمى لعدة فلزات.

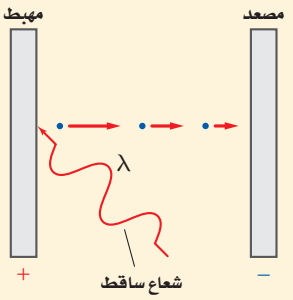
مثـــال 2

اقتران الشغل والطاقة تستخدم خلية ضوئية مهبطًا من الصوديوم. فإذا كان طول موجة العتبة λ_0 لمهبط الصوديوم 536 nm

a. احسب اقتران الشغل للصوديوم بوحدة eV .

b. إذا سقط إشعاع فوق بنفسجي طوله الموجي 348 nm على الصوديوم فما طاقة الإلكترونات المتحررة بوحدة eV؟

1 تحليل المسألة ورسمها



- ارسم المصعد والمهبط، والإشعاع الساقط، واتجاه الإلكترون المتحرر.

المعلوم	المجهول
$\lambda_0 = 536$ nm	$\phi = ?$
$hc = 1240$ eV.nm	$KE = ?$

2 إيجاد الكمية المجهولة

a. مستخدمًا ثابت بلانك وطول موجة العتبة لإيجاد اقتران الشغل.

بالتعويض عن $\lambda_0 = 536$ nm, $hc = 1240$ eV.nm

$$\phi = hf_0 = \frac{hc}{\lambda_0} = \frac{1240 \text{ eV.nm}}{536 \text{ nm}} = 2.31 \text{ eV}$$

b. استخدم معادلة التأثير الكهروضوئي لأينشتاين لحساب طاقة الإشعاع الساقط.

بالتعويض عن $\lambda = 348$ nm

$$E = \frac{1240 \text{ eV.nm}}{\lambda} = \frac{1240 \text{ eV.nm}}{348 \text{ nm}} = 3.56 \text{ eV}$$

لحساب طاقة الإلكترون المتحرر اطرح اقتران الشغل من طاقة الإشعاع الساقط.

بالتعويض عن $E = \frac{hc}{\lambda}$ ، $\phi = \frac{hc}{\lambda_0}$

بالتعويض عن $\phi = 2.31$ eV ، $E = 3.56$ eV

$$KE = hf - hf_0 = \frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda_0} = E - \phi = 3.56 \text{ eV} - 2.31 \text{ eV} = 1.25 \text{ eV}$$

3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** إجراء التحليل البعدي على الوحدات يؤكد أن وحدة eV هي الوحدة المناسبة للطاقة الحركية KE.
- **هل للإشارة معنى؟** الطاقة الحركية موجبة دائمًا.
- **هل الجواب منطقي؟** ينبغي أن تكون الطاقات مقادير قليلة من الإلكترون فولت.

مسائل تدريبية

5. احسب تردد العتبة للزنك بوحدة Hz، واقتران الشغل بوحدة eV، إذا كان طول موجة العتبة للزنك 310 nm
6. ما مقدار الطاقة الحركية بوحدة eV للإلكترونات المتحررة من السيزيوم، عندما يسقط عليه ضوء بنفسجي طوله الموجي 425 nm، إذا كان اقتران الشغل له 1.96 eV
7. إذا كان اقتران الشغل لفلز 4.50 eV، فما مقدار أكبر طول موجي للإشعاع الساقط عليه، بحيث يكون قادرًا على تحرير إلكترونات منه؟

تأثير كومبتون The Compton Effect

يُظهر التأثير الكهروضوئي أن للفوتون – رغم أنه ليس له كتلة – طاقة حركية تمامًا كما للجسيمات، وفي عام 1916م اقترح أينشتاين أن الفوتون يجب أن يكون له خاصية جسيمية أخرى، هي الزخم (كمية التحرك). وبيّن أن زخم الفوتون يجب أن يساوي E/c، ولأن $E = hf$ و $f/c = 1/\lambda$، فإن زخم الفوتون يعطى بالمعادلة.

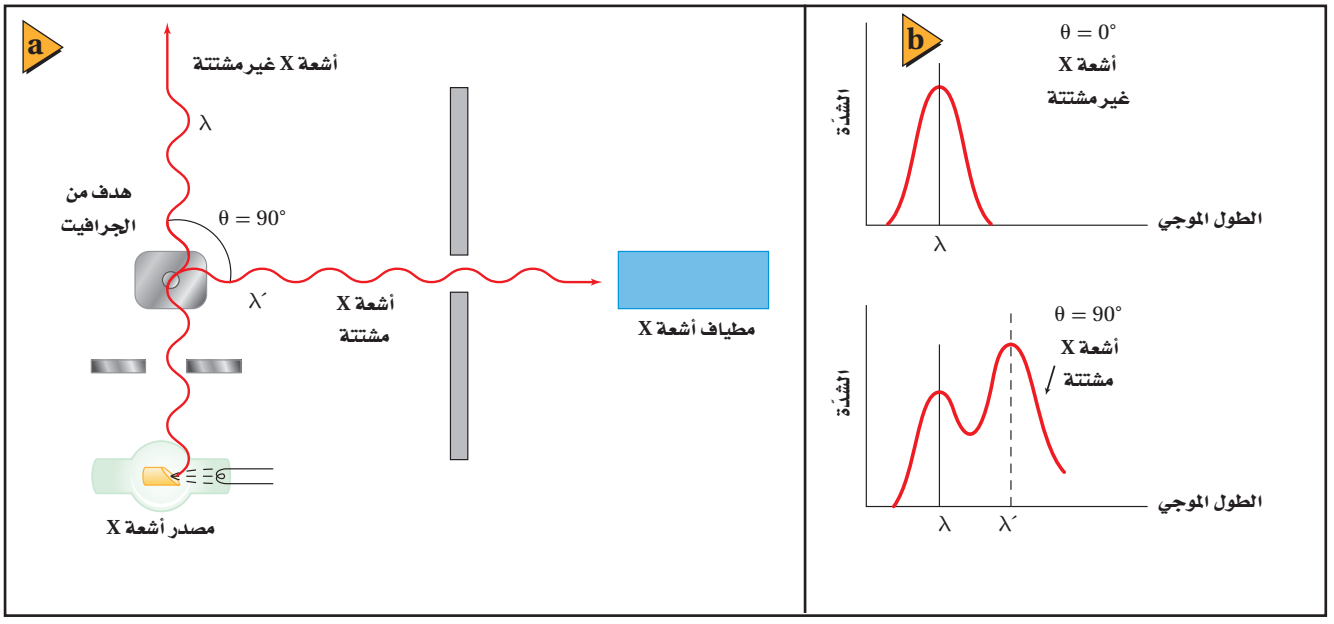
زخم الفوتون

زخم الفوتون يساوي حاصل قسمة ثابت بلانك على الطول الموجي للفوتون.

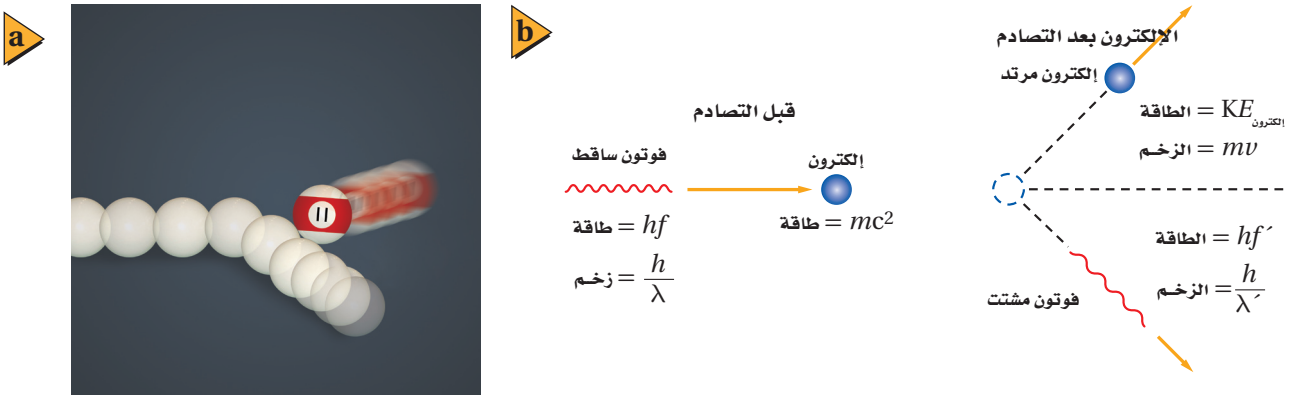
$$p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

اختبرت تجارب أجراها الفيزيائي الأمريكي أرثر هولي كومبتون عام 1922م نظرية أينشتاين. وقد دعمت نتائج تجارب كومبتون النموذج الجسيمي للضوء. حيث سلّط كومبتون أشعة X ذات طول موجي معلوم على هدف من الجرافيت، كما هو موضح في **الشكل 7a–1**، وقاس الأطوال الموجية لأشعة X التي شتتها الهدف. لاحظ كومبتون أن بعض أشعة X المُشَتَّتة لم يتغير طولها الموجي، في حين أصبح لبعضها الآخر طول موجي أكبر مما للإشعاع الساقط. و**الشكل 7b–1** يوضح هذه النتائج. ويلاحظ من الشكل أن الطول الموجي المقابل لأكبر شدة لأشعة X غير المشتتة يتطابق مع مثيله لأشعة X الساقطة، بينما الطول الموجي المقابل لأكبر شدة لأشعة X المشتتة، أكبر من مثيله لأشعة X الساقطة.

وبما أن معادلة طاقة الفوتون $E = hf$ فإنه يمكن كتابتها أيضًا على شكل $E = hc/\lambda$، وتبين هذه المعادلة أن طاقة الفوتون تتناسب عكسيًّا مع طوله الموجي. فالزيادة في الطول الموجي الذي لاحظه كومبتون، تعني أن فوتونات أشعة X قد فقدت طاقة وزخمًا. وتسمى الإزاحة في طاقة الفوتونات المشتتة **تأثير كومبتون**. وهذه الإزاحة في الطاقة صغيرة جدًّا، ولها تأثير قابل للقياس عند استخدام أشعة X بأطوال موجية في حدود 10^{-2} nm أو أقل.



الشكل 7–1 استخدم كومبتون أدوات مشابهة لهذه الأدوات في دراسة طبيعة الفوتونات (**a**). زيادة الطول الموجي للفوتونات المشتتة دليل على أن فوتونات أشعة X قد فقدت طاقة (**b**).



الشكل 8–1 تصادم كرتي بلياردو (a) يشبه تمامًا ما يحدث عند اصطدام فوتون بإلكترون؛ حيث إن الطاقة والزخم اللذين يكتسبهما الإلكترون يساويان الطاقة والزخم اللذين يفقدهما الفوتون (b).

في تجارب لاحقة، لاحظ كومبتون تحرر إلكترونات من حاجز الجرافيت خلال إجراء التجربة. كما لاحظ أن تردد الأشعة المشتتة أقل من تردد الأشعة الساقطة، وفسر هذه النتيجة بأن فوتونات أشعة X اصطدمت بالإلكترونات الموجودة في هدف الجرافيت، ونقلت الطاقة والزخم إليها. اعتقد كومبتون أن تصادمات الفوتون– إلكترون هذه مشابهة تمامًا للتصادمات المرنة في كرات البلياردو، كما هو موضح في **الشكل 8–1**. واختبر هذه الفكرة من خلال قياس طاقة الإلكترونات المتحررة، ووجد كومبتون، أن الطاقة والزخم اللذين تكتسبها الإلكترونات يساويان الطاقة والزخم اللذين تفقدهما الفوتونات؛ لذا فإن الفوتونات تحقق قانوني حفظ الزخم والطاقة عندما تصطدم بجسيمات أخرى.

1–1 مراجعة

8. **التأثير الكهروضوئي** لماذا يكون الضوء ذو الشدة العالية والتردد المنخفض غير قادر على تحرير إلكترونات من فلز، في حين أن الضوء ذا الشدة المنخفضة والتردد العالي يستطيع ذلك؟ فسّر إجابتك.
9. **تردد إشعاع الجسم الساخن وطاقته** كيف يتغير تردد الإشعاع المقابل لأعلى شدة عندما ترتفع درجة حرارة الجسم؟ وكيف تتغير الكمية الكلية للطاقة المنبعثة؟
10. **التأثير الكهروضوئي وتأثير كومبتون** سلّط عالمٌ أشعةَ X على هدف، فانطلق إلكترون من الهدف دون أن ينبعث أي إشعاع آخر. وضّح ما إذا كان هذا الحدث ناتجًا عن التأثير الكهروضوئي، أم عن تأثير كومبتون.
11. **التأثير الكهروضوئي وتأثير كومبتون** ميّز بين التأثير الكهروضوئي، وتأثير كومبتون.
12. **التأثير الكهروضوئي** اصطدم ضوء أخضر $\lambda=532\ nm$ بفلز ما، فحرر إلكترونات منه. إذا تم إيقاف هذه الإلكترونات باستخدام فرق جهد 1.44 V، فما مقدار اقتران الشغل للفلز بوحدة eV؟
13. **طاقة فوتون** تنبعث فوتونات طولها الموجي 650 nm من مؤشر ليزر. ما مقدار طاقة هذه الفوتونات بوحدة eV؟
14. **التأثير الكهروضوئي** امتُصّت أشعة X في عظم، وحررت إلكترونًا. إذا كان الطول الموجي لأشعة X 0.02 nm تقريبًا، فاحسب طاقة الإلكترون بوحدة eV.
15. **تأثير كومبتون** أُسقطت أشعة X على عظم، فاصطدمت بإلكترون فيه وتشتت. كيف تقارن بين الطول الموجي لأشعة X المشتتة، والطول الموجي لأشعة X الساقطة؟
16. **التفكير الناقد** تخيل أن تصادم كرتَيْ بلياردو ينمذج التفاعل الذي يحدث بين فوتون وإلكترون خلال تأثير كومبتون. افترض أن بروتونًا– وكتلته أكبر كثيرًا من كتلة الإلكترون– وُضع بدلاً من الإلكترون، فهل تكون الطاقة التي يكتسبها البروتون نتيجة التصادم مساوية لتلك التي يكتسبها الإلكترون؟ وهل تكون الطاقة التي يفقدها الفوتون مساوية لتلك التي يفقدها عندما يتصادم بالإلكترون؟

لقد أظهر كل من التأثير الكهروضوئي وتأثير كومبتون، أن للموجات الكهرومغناطيسية العديمة الكتلة زخمًا وطاقة كالجسيمات. وإذا كان للموجات الكهرومغناطيسية خصائص جسيمية، فهل يمكن للجسيمات أن تسلك سلوك الموجات، وذلك بأن تظهر التداخل والحيود؟ وبعبارة أخرى: هل للجسيمات خصائص موجية؟ توقع العالم دي برولي عام 1923م، أن للجسيمات المادية خصائص موجية. وكان هذا التوقع غير عادي، وقد قوبل بالرفض من علماء آخرين حينها، حتى قرأ أينشتاين أبحاث دي برولي العلمية وأيده في ذلك.

موجات دي برولي De Broglie Waves

تذكر أن الزخم الخطي للجسم يساوي كتلته مضروبة في سرعته $p = mv$، وقياسًا على زخم الفوتون $p = h/\lambda$ ، توقع دي برولي أن زخم الجسيم يعبر عنه بالمعادلة التالية:

$$p = mv = \frac{h}{\lambda}$$

يمثل الطول الموجي λ في العلاقة أعلاه طول الموجة المصاحبة للجسيم المتحرك، ويسمى **طول موجة دي برولي**. وتعطي المعادلة التالية طول موجة دي برولي مباشرة.

طول موجة دي برولي

طول موجة دي برولي المصاحبة لجسيم متحرك تساوي حاصل قسمة ثابت بلانك على زخم الجسيم.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

اعتمادًا على نظرية دي برولي، ينبغي أن تُظهر جسيمات مثل الإلكترونات والبروتونات خصائص موجية، مثل التداخل والحيود. لذا كان إنجاز دي برولي عظيمًا، رغم وجود شك كبير في نظريته. إلا أنه في عام 1927م أجريت تجربتان مستقلتان أثبتت نتائجهما أن الإلكترونات تحيد تمامًا كالضوء. ففي إحدى التجربتين سلّط العالم الإنجليزي جورج تومسون حزمة من الإلكترونات على بلورة رقيقة جدًّا؛ حيث أن ذرات البلورات مرتبة بنمط منتظم يجعلها تعمل عمل محزوز حيود. فكوّنت الإلكترونات حيودًا بالأنماط نفسها التي تكوّنها أشعة X التي لها الطول الموجي نفسه. ويوضح **الشكل 9–1** النمط الذي يكوِّنه حيود الإلكترونات. وفي الولايات المتحدة الأمريكية أجرى كلينتون دافيسون، ولاستر جيرمر تجربة مشابهة، مستخدمين إلكترونات منعكسة عن بلورات سميكة. ولقد أثبتت التجربتان أن للجسيمات المادية خصائص موجية.

إن الطبيعة الموجية للأجسام التي تراها، وتتعامل معها يوميًّا، لا يمكن ملاحظتها، لأن أطوالها الموجية قصيرة جدًّا. فمثلاً، عند دراسة طول موجة دي برولي المصاحبة لكرة قدم كتلتها 0.145 kg، وسرعتها 38 m /s، نجد أن طولها الموجي:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34}\ \text{J.s}}{(0.145\ \text{kg})(38\ \text{m/s})} = 1.2 \times 10^{-34}\ \text{m}$$

الفيزياء في حياتك:

تقوم المجاهر الإلكترونية النافذة (TEM) بتصوير الأجسام الصغيرة عن طريق الكشف عن كيفية حيود الإلكترونات عند إرسالها عبر عينة، ويرتبط الحيود عادة بالموجات. لذلك، لكي تعمل هذه المجاهر، فلا بد أن تمتلك الإلكترونات بعض الخصائص الموجية.

تساؤلات جوهرية:

- ما الأدلة على الطبيعة الموجية للمادة؟
- ما هي الطبيعة الموجية للمادة؟
- ما أهمية مبدأ هيزنبرج؟

المفردات:

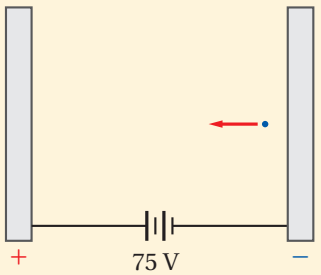
- طول موجة دي برولي
- مبدأ عدم التحديد

الشكل 9–1 تُظهر أنماط حيود الإلكترونات – كهذا النمط الخاص ببلورة زركونيوم مكعبة – الخصائص الموجية للجسيمات.

مثـــال 3

طول موجة دي برولي إذا تسارع إلكترون خلال فرق جهد 75 V، فما مقدار طول موجة دي برولي المصاحبة له؟

1 تحليل المسألة ورسمها



- ضمّن رسمك اللوحين الموجب والسالب.

المعلوم

$V = 75\ V \quad m = 9.11\times10^{-31}\ kg$

$h = 6.63\ \times10^{-34}\ J.s$

$q = -1.6\times10^{-19}\ C$

المجهول

$\lambda = ?$

2 إيجاد الكمية المجهولة

اكتب علاقتين لطاقة حركة الإلكترون؛ الأولى بدلالة فرق الجهد، والأخرى بدلالة الحركة، واستخدمهما لحساب سرعة الإلكترون.

$KE = -qV$ ،$KE = \frac{1}{2}mv^2$

ساوِ بين علاقتي الطاقة الحركية KE.

$\frac{1}{2}mv^2 = -qV$

حل بالنسبة إلى المتغير v

$v = \sqrt{\frac{-2qV}{m}}$

بالتعويض عن $m = 9.11\times10^{-31}\ kg$

$q = -1.60\times10^{-19}\ C$ ،$V = 75\ V$

$= \sqrt{\frac{-2(-1.60\ \times10^{-19}\ C)(75\ V)}{(9.11\times10^{-31}\ kg)}}$

$= 5.1\ \times10^{6}\ m/s$

$p = mv$

حل بالنسبة إلى الزخم

بالتعويض عن $m = 9.11\times10^{-34}\ kg$

$v = 5.1\times10^{6}\ m/s$

$= (9.11\times10^{-31}\ kg)(5.1\times10^{6}\ m/s)$

$= 4.6\times10^{-24}\ kg.m/s$

$\lambda = \frac{h}{p}$

حل بالنسبة إلى طول موجة دي برولي

بالتعويض عن $h = 6.63\times10^{-34}\ J.s$

$p = 4.6\times10^{-24}\ kg.\ m/s$

$= \frac{6.63\times10^{-34}\ J.s}{4.6\times10^{-24}\ kg.m/s}$

$= 1.4\times10^{-10}\ m = 0.14\ nm$

3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** التحليل البعدي للوحدات يثبت أن وحدة m/s للسرعة v، ووحدة nm للطول الموجي λ.
- **هل للإشارات معنى؟** القيم الموجبة متوقعة لكل من v و λ.
- **هل الجواب منطقي؟** الطول الموجي قريب من 0.1 nm، والذي يقع في منطقة الطول الموجي لأشعة X في الطيف الكهرومغناطيسي.

مسائل تدريبية

17. تتدحرج كرة بولنج كتلتها 7.0 kg بسرعة 8.5 m/s، أجب عما يلي:

a. ما مقدار طول موجة دي برولي المصاحبة للكرة؟ **b.** لماذا لا تُظهر كرة البولنج سلوك موجي ملاحظ؟

18. ما مقدار فرق الجهد اللازم لمسارعة إلكترون بحيث يكون طول موجة دي برولي المصاحبة له 0.125 nm؟

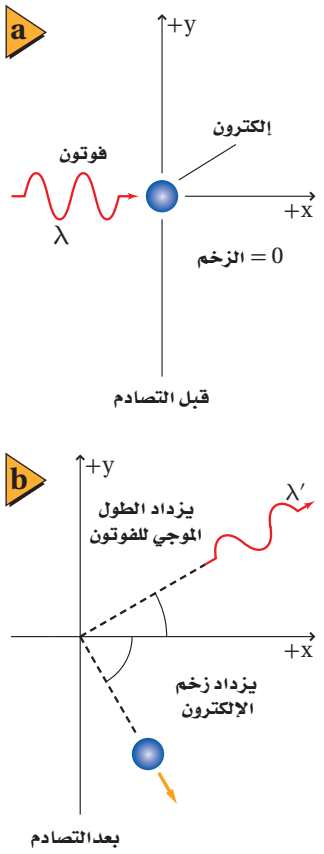
19. طول موجة دي برولي للإلكترون في المثال 3 يساوي 0.14 nm، ما مقدار الطاقة الحركية بوحدة eV لبروتون ($m = 1.67\times10^{-27}\ kg$) إذا كان له الطول الموجي نفسه؟

الجسيمات والموجات Particles and Waves

هل الضوء جسيم أم موجة؟ تشير الدلائل إلى أن كلًّا من النموذج الجسيمي، والنموذج الموجي يلزمان لتفسير سلوك الضوء. وقد قادت نظرية الكم والطبيعة المزدوجة للإشعاع الكهرومغناطيسي إلى مبادئ علمية وتطبيقات رائعة، ومنها المجهر النفقي الماسح (STM).

تحديد الموقع والزخم وفقًا للنموذج الجسيمي فإنه عند تحديد موقع جسيم وسرعته في لحظة زمنية معينة، فلابد من وجود أخطاء تجريبية، تُعزى إلى أدوات القياس أو الشخص الذي يقيس، ويمكن تقليل هذه الأخطاء إلى درجة تكون فيها هذه القياسات دقيقة. ولكن حسب نظرية الكم فإنه لتحديد موقع الجسيم فإننا نسلط ضوءًا عليه ثم تجمع الضوء المنعكس عنه، إلا أنه بسبب تأثيرات الحيود، فإن الضوء ينتشر؛ مما يجعل من المستحيل تحديد موقعه بدقة، ولكن استخدام ضوء ذي طول موجي أقصر، يقلل من تأثيرات الحيود ويسمح بتحديد موقع الجسيم بدقة أكبر، إلا أنه في الوقت نفسه يزداد الخطأ في تحديد زخم الجسيم.

مبدأ عدم التحديد لهيزنبرج من نتائج تأثير كومبتون أنه عندما يصطدم إشعاع طوله الموجي قصير، وطاقته عالية بجسيم، فإن زخم الجسيم يتغير، كما في **الشكل 10–1**. وبناء على ذلك، يؤثر تحديد موقع الجسيم بدقة في تغير زخمه. وكلما زادت الدقة في تحديد موقع جسيم زاد عدم التحديد في قياس زخمه. وبالطريقة نفسها إذا تم قياس زخم الجسيم بدقة، فإن موقعه يتغير ويصبح أقل تحديدًا. لُخِّصت هذه الحالة في **مبدأ عدم التحديد**، والذي ينص على أنه من غير الممكن قياس زخم جسيم وتحديد موقعه بدقة في الوقت نفسه. إن هذا المبدأ – والذي سمّي باسم الفيزيائي الألماني فيرنر هيزنبرج – هو نتيجة للطبيعة المزدوجة للضوء والمادة. ويخبرنا مبدأ عدم التحديد لهيزنبرج أن هناك حدًّا للدقة في قياس الموقع والزخم.



الشكل 10–1 يمكن أن يرى الجسيم فقط عندما يتشتت الضوء عنه، لذا فإن الإلكترون يبقى غير محدد حتى يصطدم به فوتون (a) يُشتت التصادم كلًا من الفوتون، والإلكترون ويغير من زخميهما (b).

2–1 مراجعة

20. **الخصائص الموجية** صف التجربة التي أثبتت أن للجسيمات خصائص موجية.
21. **الطبيعة الموجية** فسّر لماذا لا يمكن ملاحظة الطبيعة الموجية للأجسام التي نراها؟
22. **طول موجة دي برولي** ما مقدار طول موجة دي برولي المصاحبة لإلكترون يتسارع خلال فرق جهد 125 V؟
23. **الأطوال الموجية للمادة والإشعاع** عندما يصطدم إلكترون بجسيم ثقيل، فإن سرعة الإلكترون، وطول موجته يتناقصان. بناء على ذلك، كيف يمكن زيادة الطول الموجي لفوتون؟
24. **مبدأ عدم التحديد** عندما يمر ضوء او حزمة من ذرات خلال شق مزدوج، فإنه يتكون نمط تداخل. وتحدث كلتا النتيجتين حتى عندما تمر الذرات أو الفوتونات خلال الشقين في الوقت نفسه. كيف يفسر مبدأ عدم التحديد ذلك؟
25. **التفكير الناقد** ابتكر الفيزيائيون مؤخرًا محزوز حيود للموجات الضوئية الموقوفة (المستقرة). وتكوِّن الذرات التي تمر خلال المحزوز نمط تداخل. إذا كانت المسافة الفاصلة بين الشقوق $\frac{1}{2}\lambda$ (250 nm تقريبًا)، فما مقدار طول موجة دي برولي المصاحبة للذرات تقريبًا؟

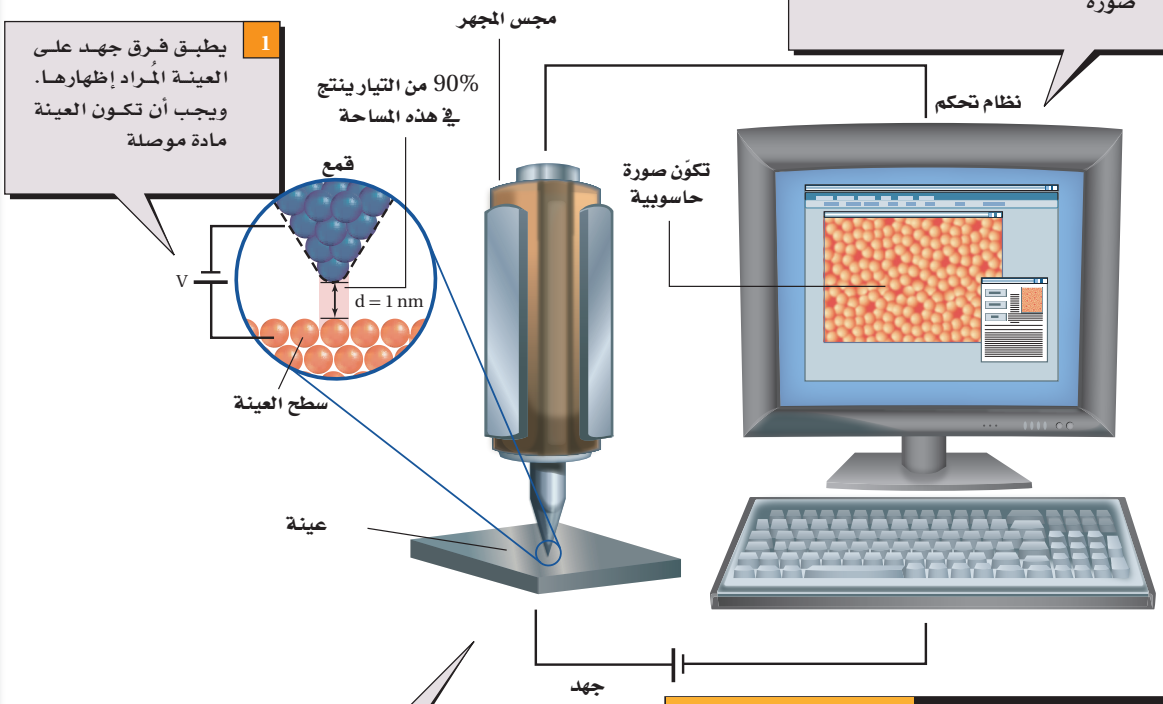
كيف يعمل

How it Works

المجهر النفقي الماسح؟ Scanning Tunneling Microscope?

اخترع العالمان جيرد بينج وهنرش روهرير عام 1981م المجهر النفقي الماسح (STM)، وحصلا بعد خمس سنوات على جائزة نوبل في الفيزياء. والمجهر النفقي الماسح قادر على تصوير سطوح المواد بقوة تمييز تصل إلى المستوى الذري. وقد مكّن هذا العلماء من تكوين صور للذرات، كصورة ذرات السيليكون الظاهرة على الشاشة أدناه. كيف يعمل STM؟

3 يحرك نظام تحكم المجس فوق سطح العينة إلى الخلف والأمام وإلى أعلى وأسفل لمسحها. وبتثبيت المسافة بين السطح ورأس المجس يتولد تيار كهربائي ثابت. تُسجّل حركة رأس المجس إلى أعلى وأسفل وتحول إلى صورة



1 يطبق فرق جهد على العينة المُراد إظهارها. ويجب أن تكون العينة مادة موصلة

2 يوضع رأس مجس مجهر STM قريبًا جدًا من العينة (1nm تقريبًا فوق السطح). وكما هو متوقع من خلال نظرية الكم، فإن بعض الإلكترونات تقفز بين سطح العينة ورأس المجس، وينتج عن حركة الإلكترونات هذه تيار كهربائي (يقاس بالنانو أمبير).

التفكير الناقد

1. **احسب** إذا كان التيار الكهربائي المتولد بين رأس المجس وسطح العينة 1.0×10^{-9} A، فما عدد الإلكترونات المتدفقة إلى رأس المجس خلال ثانية واحدة؟
2. **قوّم** تُعطى العلاقة بين التيار I والمسافة d بين رأس المجس والعينة في مجهر STM بالمعادلة $I = I_o e^{-kd}$، حيث I_o و k ثوابت. استخدم عينة قيم لتتحقق من أن التيار يتناقص عندما تزداد المسافة.
3. **صمم تجربة** ماذا تفعل إذا أردت استعمال مجهر STM لتدرس عينة غير موصلة؟

الفصل 1
دليل الدراسة

1–1 النموذج الجسيمي للموجات Aparticle Model of Waves

المفردات
- طيف انبعاث
- مكمّاة
- التأثير الكهروضوئي
- تردد العتبة
- جهد الإيقاف
- الفوتون
- اقتران الشغل
- تأثير كومبتون

الفكرة الرئيسة : يمكن للضوء أن يسلك كجسيمات عديمة الكتلة تسمى الفوتونات.

- تبعث الأجسام التي تسخن لدرجة التوهج ضوءًا بسبب اهتزازات الجسيمات المشحونة الموجودة في ذراتها.
- يُغطي طيف الأجسام المتوهجة، مدًى واسعًا من الأطوال الموجية. ويعتمد الطيف على درجة حرارة الأجسام المتوهجة.
- فسّر العالم بلانك طيف الجسم المتوهج، مفترضًا أن للجسيمات مقادير محددة من الطاقة فقط، وهي تساوي مضاعفات ثابت بلانك.

$$E = nhf$$

- فسّر أينشتاين التأثير الكهروضوئي، مفترضًا أن الضوء يكون على شكل حزم من الطاقة تسمى الفوتونات.

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(1240\,\text{eV.nm})}{\lambda(\text{nm})}$$

- التأثير الكهروضوئي هو انبعاث إلكترونات من فلزات معينة، عندما تتعرض لإشعاع كهرومغناطيسي.

$$KE = hf - hf_0$$

- تمكن العلماء من حساب قيمة ثابت بلانك h اعتمادًا على التأثير الكهروضوئي.
- يقاس اقتران الشغل – والذي يكافئ طاقة ربط الإلكترون – باستخدام تردد العتبة في التأثير الكهروضوئي.
- يبيّن تأثير كومبتون أن للفوتون زخمًا كما توقع أينشتاين.

$$p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

- تتحرك الفوتونات بسرعة الضوء. ورغم أنه ليس لها كتلة إلا أن لها طاقة وزخمًا.

1–2 موجات المادة Matter Waves

المفردات
- طول موجة دي برولي
- مبدأ عدم التحديد

الفكرة الرئيسة : الجسيمات المتحركة لها خصائص موجية.

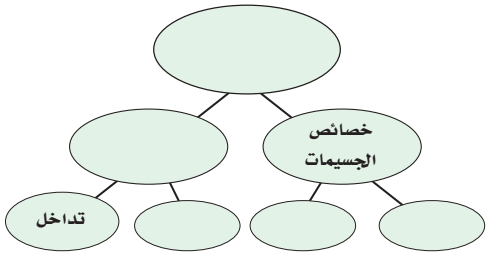
- اقترح العالم دي برولي الطبيعة الموجية للجسيمات المادية، وتم التحقق منها عمليًّا عن طريق حيود الإلكترونات خلال البلورات. ولكل الجسيمات المتحركة طول موجي، يعرف بطول موجة دي برولي.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

- تتكامل الطبيعتان الجسيمية والموجية معًا لوصف الطبيعة الكاملة لكل من المادة والطاقة.
- ينص مبدأ عدم التحديد لهيزنبرج على أنه من غير الممكن تحديد موقع وزخم أي جسيم ضوئي أو مادي بدقة عالية في آن واحد.

خريطة المفاهيم

26. أكمل خريطة المفاهيم أدناه، باستخدام المصطلحات التالية: *الطبيعة المزدوجة، الكتلة، الخصائص الموجية، الزخم، الحيود.*



إتقان المفاهيم

27. **الضوء المتوهج** يضبط مصباح كهربائي متوهج باستخدام مفتاح تحكم. ماذا يحدث للون الضوء الصادر عن المصباح عند إدارة مفتاح التحكم إلى أقل قراءة؟

28. وضّح مفهوم تكمية الطاقة.

29. ما الذي تم تكميته في تفسير ماكس بلانك لإشعاع الأجسام المتوهجة؟

30. ماذا تسمى كمّات الضوء؟

31. سُلِّط ضوء على مهبط خلية ضوئية، وكان تردد الضوء أكبر من تردد العتبة لفلز المهبط. كيف تفسر نظرية أينشتاين للتأثير الكهروضوئي حقيقة زيادة تيار الإلكترونات الضوئية كلما زادت شدة الضوء؟

32. وضح كيف فسّرت نظرية أينشتاين حقيقة أن الضوء الذي تردده أقل من تردد العتبة لفلز لا يحرر إلكترونات ضوئية منه، بغض النظر عن شدة الضوء؟

33. **الفيلم الفوتوجرافي** لأن أنواعًا معينة من أفلام الأبيض والأسود ليست حساسة للضوء الأحمر، فإنه يمكن تحميضها في غرفة مظلمة مضاءة بضوء أحمر. فسّر ذلك بناءً على نظرية الفوتون للضوء.

34. كيف أظهر تأثير كومبتون أن للفوتونات زخمًا، كما أن لها طاقة؟

35. الزخم p لجسيم مادي يعطى بالمعادلة $p = mv$ هل تستطيع حساب زخم فوتون مستخدمًا المعادلة نفسها؟ وضح إجابتك.

36. وضح كيف يمكن قياس الخصائص التالية للإلكترون:

a. الشحنة **b.** الكتلة **c.** الطول الموجي

37. وضح كيف يمكن قياس الخصائص التالية للفوتون:

a. الطاقة **b.** الزخم **c.** الطول الموجي .

تطبيق المفاهيم

38. استخدم طيف الانبعاث لجسم متوهج عند ثلاث درجات حرارة مختلفة كما في **الشكل 1–1** وأجب عن الأسئلة الآتية:

a. عند أي طول موجي تكون شدة الانبعاث أكبر ما يكون لكل من درجات الحرارة؟

b. ماذا تستنتج عن العلاقة بين التردد الذي تكون عنده شدة الإشعاع المنبعث أكبر ما يمكن، وبين درجة حرارة الجسم المتوهج؟

39. وضع قضيبان من الحديد في النار، فتوهج أحدهما باللون الأحمر الداكن، بينما توهج الآخر باللون البرتقالي الساطع. أي القضيبين:

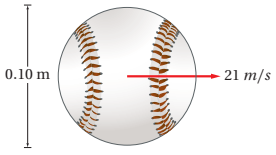
a. أكثر سخونة؟ **b.** يشع طاقة أكبر؟

40. هل يحرر ضوء تردده كبير عددًا أكبر من الإلكترونات من سطح حساس للضوء مقارنة بضوء تردده أقل، مع افتراض أن كلا الترددين أكبر من تردد العتبة؟

41. تنبعث إلكترونات ضوئية من البوتاسيوم عندما يسقط عليه ضوء أزرق، في حين تنبعث إلكترونات ضوئية من التنجستن عندما يسقط عليه أشعة فوق بنفسجية. أي الفلزين:

a. له تردد عتبة أكبر؟ **b.** له اقتران شغل أكبر؟

42. قارن طول موجة دي برولي المصاحبة لكرة البيسبول، الموضحة في **الشكل 11–1** بقطر الكرة.



الشكل 11–1

الفصل 1
التقويم

إتقان حل المسائل

1–1 النموذج الجسيمي للموجات

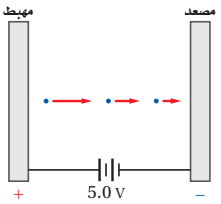
43. اعتمادًا على نظرية بلانك، كيف يتغير تردد اهتزاز ذرة إذا بعثت طاقة مقدارها 5.44×10^{-19} J عندما تغيّرت قيمة n بمقدار 1؟

44. ما مقدار فرق الجهد اللازم لإيقاف إلكترونات طاقتها الحركية العظمى 4.8×10^{-19} J؟

45. ما زخم فوتون الضوء البنفسجي الذي طوله الموجي 4.0×10^{2} nm؟

46. جهد الإيقاف لإلكترونات فلز معين موضح في **الشكل 12–1**. ما مقدار الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية؟ بدلالة الوحدات التالية:

a. الإلكترون فولت. **b.** الجول.



الشكل 12–1

47. تردد العتبة لفلز معين 3.00×10^{14} Hz، ما مقدار الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحررة إذا أضيء الفلز بضوء طوله الموجي 6.50×10^{2} nm؟

48. ما مقدار الشغل اللازم لتحرير إلكترون من سطح الصوديوم إذا كان تردد العتبة له 4.4×10^{14} Hz؟

49. إذا سقط ضوء تردده 1.00×10^{15} Hz على الصوديوم في المسألة السابقة، فما مقدار الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية؟

50. **مقياس الضوء** يستعمل مقياس الضوء الفوتوجرافي خلية كهروضوئية، لقياس الضوء الساقط على الجسم المراد تصويره. كم يجب أن يكون اقتران الشغل لمادة المهبط حتى تكون الخلية الكهروضوئية حساسة للضوء الأحمر (λ= 680 nm) كما للألوان الأخرى للضوء؟

2–1 موجات المادة

51. ما مقدار طول موجة دي برولي المصاحبة لإلكترون يتحرك بسرعة 3.0×10^{6} m/s؟

52. ما مقدار السرعة التي يجب أن يتحرك بها إلكترون لتكون طول موجة دي برولي المصاحبة له 3.0×10^{-10} m؟

53. يتسارع إلكترون في أنبوب أشعة مهبطية من السكون، خلال فرق جهد 5.0×10^{3} V، أوجد ما يأتي:

a. سرعة الإلكترون.

b. الطول الموجي المصاحب للإلكترون.

54. احتُجز نيوترون طاقته الحركية 0.025 eV، أوجد ما يأتي:

a. سرعة النيوترون.

b. طول موجة دي برولي المصاحبة للنيوترون.

55. إذا كانت الطاقة الحركية لإلكترون ذرة الهيدروجين 13.65 eV، فاحسب:

a. مقدار سرعة الإلكترون.

b. مقدار طول موجة دي برولي المصاحبة للإلكترون.

c. محيط ذرة الهيدروجين ثم قارنه بطول موجة دي برولي المصاحبة لإلكترون الذرة. علمًا بأن نصف قطر ذرة الهيدروجين 0.519 nm

56. إذا كان طول موجة دي برولي المصاحبة لإلكترون 0.18 nm، فأجب عما يأتي:

a. ما مقدار فرق الجهد الذي تحرك خلاله إذا بدأ الحركة من السكون؟

b. إذا كان طول موجة دي برولي المصاحبة لبروتون 0.18 nm، فما مقدار فرق الجهد الذي تحرك خلاله إذا بدأ الحركة من السكون؟

مراجعة عامة

57. إذا كان تردد العتبة لفلز ما 8.0×10^{14} Hz، فما اقتران الشغل له؟

58. إذا سقط ضوء تردده 1.6×10^{15} Hz على الفلز في المسألة السابقة، فما مقدار الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية؟

تقويم الفصل 1

59. احسب طول موجة دي برولي المصاحبة لديوترون (نواة نظير الهيدروجين $^{2}_{1}H$) كتلته 3.3×10^{-27} kg ويتحرك بسرعة 2.5×10^{4} m/s

60. إذا كان اقتران الشغل للحديد 4.7 eV، فأجب عما يأتي:

a. ما مقدار طول موجة العتبة له؟

b. إذا أُسقط إشعاع طوله الموجي 150 nm على الحديد، فما مقدار الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحررة بوحدة eV؟

61. إذا كان اقتران الشغل للباريوم 2.48 eV، فما أكبر طول موجي للضوء يستطيع تحرير إلكترونات منه؟

62. طول موجة دي برولي المصاحبة لإلكترون 400.0 nm، وهي تساوي أقصر طول موجي للضوء المرئي. احسب مقدار:

a. سرعة الإلكترون. **b.** طاقة الإلكترون بوحدة eV.

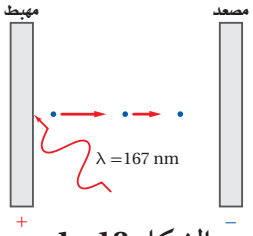
63. **المجهر الإلكتروني** يعدّ المجهر الإلكتروني مفيدًا؛ لأنه يمكن جعل الأطوال الموجية لموجات دي برولي المصاحبة للإلكترونات أقصر من الطول الموجي للضوء المرئي. ما مقدار الطاقة (بوحدة eV) اللازم تزويدها لإلكترون حتى يكون طول موجة دي برولي المصاحبة له 20.0 nm؟

64. يسقط إشعاع على قصدير، كما في **الشكل 13–1**. إذا كان تردد العتبة للقصدير 1.2×10^{15} Hz، فما مقدار:

a. طول موجة العتبة للقصدير؟

b. اقتران الشغل للقصدير؟

c. الطاقة الحركية للإلكترونات المتحررة بوحدة eV، إذا كان الطول الموجي للإشعاع الكهرومغناطيسي الساقط 167 nm؟



الشكل 13–1

التفكير الناقد

65. **تطبيق المفاهيم** يبعث مصدر ليزر هيليوم– نيون فوتونات طولها الموجي 632.8 nm، أجب عما يأتي:

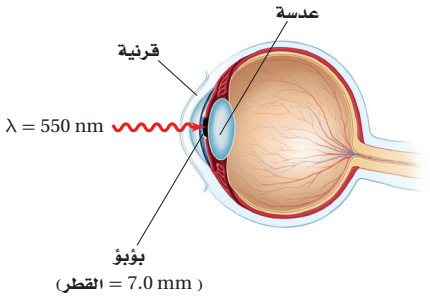
a. احسب مقدار الطاقة بوحدة الجول لكل فوتون يُبعث من الليزر.

b. إذا كانت قدرة مصدر ليزر صغير تقليدي 0.5 mW (تكافئ 5×10^{-4} J/s)، فما عدد الفوتونات المنبعثة من مصدر الليزر في كل ثانية؟

66. **تطبيق المفاهيم** يدخل الضوء المرئي الذي شدته 1.5×10^{-11} W/m^2 بصعوبة إلى عين إنسان، كما في **الشكل 14–1**.

a. إذا سلط هذا الضوء على عين الإنسان، ومر خلال بؤبؤ عينه، فما مقدار القدرة التي تدخل عينه بوحدة الواط؟

b. استخدم الطول الموجي المُعطى للضوء المرئي والمعلومات المُعطاة في الشكل 14–1، لحساب عدد الفوتونات التي تدخل العين في كل ثانية.



الشكل 14–1

الكتابة في الفيزياء

67. ابحث عن أثقل جسيم يمكن ملاحظة تأثيرات التداخل له. صف التجربة وكيف يحدث التداخل؟

تقويم الفصل 1

أسئلة اختيار من متعدد

اختر رمز الإجابة الصحيحة فيما يلي:

1. يتغير مستوى الطاقة لذرة عندما تمتص، أو تبعث طاقة. أي الخيارات الآتية لا يمكن أن يمثل مستوى طاقة لذرة؟

Ⓐ $\frac{3}{4}hf$ Ⓒ $3\,hf$

Ⓑ hf Ⓓ $4\,hf$

2. كيف يرتبط تردد العتبة مع التأثير الكهروضوئي؟

Ⓐ أنه أقل تردد للإشعاع الساقط اللازم لتحرير الذرات من مصعد الخلية الضوئية.

Ⓑ أنه أكبر تردد للإشعاع الساقط اللازم لتحرير الذرات من مصعد الخلية الضوئية.

Ⓒ أنه تردد الإشعاع الساقط، الذي يحرر إلكترونات من الذرة عند ترددات أقل منه.

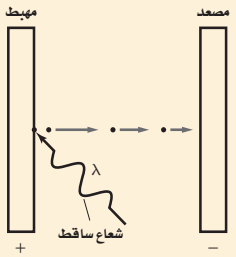
Ⓓ أنه أقل تردد للإشعاع الساقط اللازم، لتحرير إلكترونات من الذرة.

3. ما طاقة فوتون تردده 1.14×10^{15} Hz؟

Ⓐ 5.82×10^{-49} J Ⓒ 8.77×10^{-16} J

Ⓑ 7.55×10^{-19} J Ⓓ 1.09×10^{-12} J

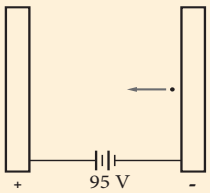
4. يسقط إشعاع طاقته 5.17 eV على خلية ضوئية، كما هو موضح في الشكل أدناه. إذا كان اقتران الشغل لمادة المهبط 2.31 eV، فما مقدار طاقة الإلكترون المتحرر؟



Ⓐ 0.00 eV Ⓒ 2.86 eV

Ⓑ 2.23 eV Ⓓ 7.48 eV

5. يتسارع إلكترون خلال فرق جهد 95.0 V، كما هو موضح في الشكل أدناه. ما مقدار طول موجة دي برولي المصاحبة للإلكترون؟



Ⓐ 5.02×10^{-22} m Ⓒ 2.52×10^{-10} m

Ⓑ 1.26×10^{-10} m Ⓓ 5.10×10^{6} m

6. ما مقدار طول موجة دي برولي المصاحبة لإلكترون، يتحرك بسرعة 391 km/s؟ (كتلة الإلكترون 9.11×10^{-31}kg)

Ⓐ 3.5×10^{-25} m Ⓒ 4.8×10^{-15} m

Ⓑ 4.79×10^{-15} m Ⓓ 1.86×10^{-9} m

7. ما اقتران الشغل لفلز؟

Ⓐ مقياس لمقدار الشغل الذي يستطيع أن يبذله إلكترون متحرر من الفلز.

Ⓑ يساوي تردد العتبة.

Ⓒ مقدار الطاقة اللازمة لتحرير الإلكترون الداخلي لذرة الفلز.

Ⓓ مقدار الطاقة اللازمة لتحرير الإلكترون الأضعف ارتباطًا في الذرة.

الأسئلة الممتدة

8. تحرك جسم بسرعة 45 m/s، فكان طول موجة دي برولي المصاحبة له 2.3×10^{-34} m، ما كتلة الجسم بوحدة kg؟

✓ إرشاد

ارتدِ ساعة

إذا كنت تخضع لاختبار ذي وقت محدد فنظّم وقتك. لا تقض وقتًا كبيرًا جدًّا في مسألة واحدة. اترك المسائل الصعبة، ثم عد إليها بعد أن تجيب عن المسائل السهلة.

الفصل 2

الذرة
The Atom

الفكرة العامة

تتكون الذرة من نواة تحتوي على البروتونات والنيوترونات، ويحيط بها إلكترون واحد أو أكثر.

2-1 نموذج بور الذري

الفكرة الرئيسة يمثل نموذج بور للذرة الذرة كنواة مركزية وإلكترونات تدور حول النواة ولها طاقات كمية محددة.

2-2 النموذج الكمي للذرة

الفكرة الرئيسة يتنبأ النموذج الكمي للذرة باحتمالية العثور على إلكترون في منطقة معينة.

يتوقع بعد الإنتهاء من دراسة هذا الفصل أن أكون قادرًا على:

- توضيح المفاهيم المرتبطة بنموذج بور الذري (جسيمات ألفا، نيوكليون، طيف الامتصاص، مستوى الطاقة، حالة الاستقرار، حالة الإثارة، عدد الكم الرئيس).
- وصف تركيب نواة الذرة.
- المقارنة بين طيف الانبعاث المستمر وطيف الانبعاث الخطي.
- حلّ مسائل باستخدام نصف قطر المستوى، ومعادلات مستويات الطاقة.
- توضيح المفاهيم المرتبطة بالنموذج الكمي للذرة (النموذج الكمي، السحابة الإلكترونية، ميكانيكا الكم، الضوء المترابط، الضوء غير المترابط، الانبعاث المحفز، الليزر).
- وصف أوجه القصور في نموذج بور الذري.
- وصف النموذج الكمي للذرة.
- توضيح كيف يعمل الليزر.
- وصف خصائص ضوء الليزر.
- تصميم تجارب وبناء نماذج تتعلق بفيزياء الذرة.
- استخدام الأدوات والأجهزة المتعلقة بفيزياء الذرة لإجراء التجارب وتمثيل البيانات وتحليلها.
- استقصاء وحل المشكلات المتعلقة ببعض مفاهيم فيزياء الذرة.
- إدراك دور فيزياء الذرة في الحياة اليومية.

فكِّر

ما الذي يسبب اختلاف ألوان الإضاءة. وكيف تستطيع تحديد نوع الغاز المستخدم في كل أنبوب؟

الفيزياء عبر المواقع الإلكترونية
www.obeikaneducation.com

تجربة استهلالية

كيف يمكن اختيار نوع قطعة نقدية فلزية تدور لتكون نموذجًا لتعرّف نوع الذرات؟

سؤال التجربة أثناء دوران أي من القطع النقدية من فئات 5 فلسات أو 10 فلسات أو 25 فلسًا أو 50 فلسًا، أو 100 فلس، على سطح الطاولة، ما الخصائص التي تمكنك من تعرّف نوع القطعة النقدية التي تدور؟

الخطوات

1. ضع قطعة نقدية فلزية من فئة 100 فلس رأسيًّا على سطح طاولة. ولتثبيتها المسها بطرف إصبعك ثم انقر طرفها بسبابتك لتجعلها تدور بسرعة. ولاحظ مظهر القطعة الدوّارة وصوتها إلى أن تقترب من التوقف عن الدوران على سطح الطاولة.
2. كرر الخطوة 1 ثلاثة مرات مستخدمًا قطعًا من فئات (5 و10 و25 و50) فلسًا على التوالي.
3. اطلب إلى زميلك تدوير القطع النقدية، قطعة واحدة في كل مرة وبترتيب عشوائي. شاهد كل قطعة في أثناء دورانها فقط، ثم حاول تحديد نوع تلك القطعة.
4. كرر الخطوة 3، وحاول تحديد نوع كل من القطع النقدية الدوّارة على أن تكون عيناك مغمضتين.

التحليل

ما مدى نجاحك في تحديد نوع القطع النقدية من خلال الاستماع إلى الأصوات التي تصدرها هذه القطع؟ ما خصائص القطعة الدوّارة التي يمكن أن تستخدم لتحديد نوعها؟ ما الأدوات التي يمكن أن تجعل عملية تحديد نوع القطعة النقدية أكثر سهولة؟

التفكير الناقد تبعث الذرات المثارة لعنصر ما في أنبوب غاز التفريغ طاقةً عن طريق انبعاث الضوء. كيف يمكن للضوء المنبعث أن يساعدك على تحديد نوع الذرة في أنبوب التفريغ؟ وما الأدوات التي يمكن أن تساعدك على ذلك؟

الفيزياء في حياتك:

إن الأضواء الخضراء والزرقاء والبرتقالية التي غالبًا ما تُرى في نوافذ المتاجر والمطاعم دليلاً على التركيب الذري الفريد لكل عنصر. تسمى عادةً مصابيح النيون، للحصول على مجموعة متنوعة من الألوان نستخدم أنابيب زجاجية مطلية وكهرباء عالية الجهد وخليط من الغازات.

تساؤلات جوهرية:

- ما الذي تكشف عنه تجربة رذرفورد حول تركيب الذرة؟
- ما هو طيف الانبعاث؟ وما هو طيف الامتصاص؟
- كيف يعتمد نصف قطر وطاقة مدارات الإلكترون على رقم الكم الرئيسي؟

المفردات:

- جسيمات ألفا
- طيف الامتصاص
- حالة الاستقرار
- عدد الكم الرئيس
- نيوكليون
- مستوى الطاقة
- حالة الإثارة

بنهاية القرن التاسع عشر، اتفق معظم العلماء على وجود الذرات، وقد أعطى اكتشاف تومسون للإلكترون دليلاً مقنعًا على أن الذرة تتكون من جسيمات دون ذرية. وقد وجد أن كل ذرة اختبرها تومسون تحتوي على إلكترونات سالبة الشحنة، وأن لهذه الإلكترونات كتلة صغيرة جدًّا. وعند مقارنة كتل الذرات بكتل مكوناتها من الإلكترونات وجد أن هناك كتلة مفقودة، لذا بدأ العلماء بالبحث عن الكتلة المفقودة التي يجب أن تكون جزءًا من كتلة الذرة الكلية. ما طبيعة الكتلة التي سيتم اكتشافها لاحقًا بوصفها جزءًا من الذرة؟ وكيف تتوزع هذه الكتلة داخل الذرة؟

إضافة إلى ذلك، فمعلوم أن الذرة متعادلة كهربائيًّا، وحتى تلك الفترة تم تحديد إلكترونات سالبة الشحنة داخل الذرة، فكيف تتوزع الإلكترونات سالبة الشحنة في الذرة؟ وما مصدر تعادل الذرة؟ وهل هناك جسيمات موجبة الشحنة أيضًا في الذرة؟ كان فهم العلماء الكامل عن الذرة لا يزال بعيدًا قبل الإجابة على تلك التساؤلات. من هنا بدأ العلماء في البحث عن إجابة على العديد من الأسئلة التي وضعتهم في تحدٍّ.

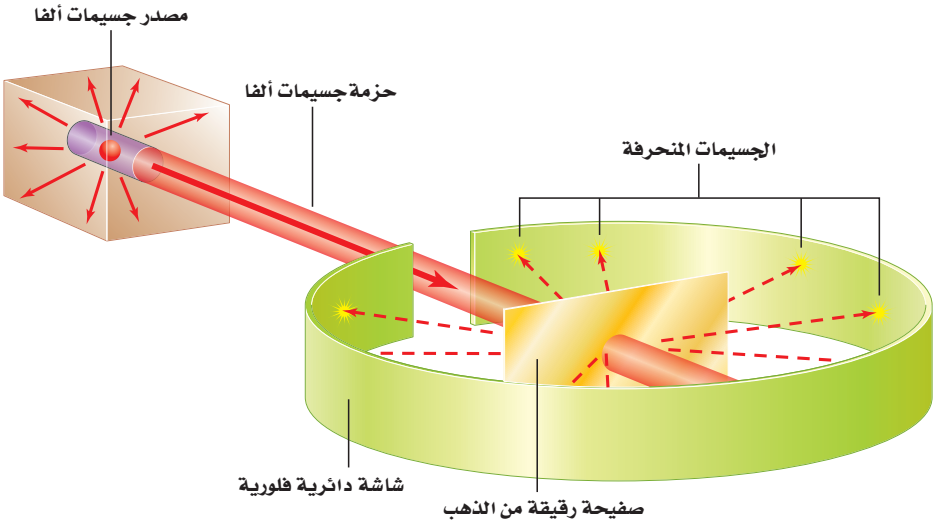
النموذج النووي The Nuclear Model

كثير من التساؤلات واجهت الباحثين حول طبيعة الذرة. ما الذي يسبب انبعاث ضوء من الذرات؟ كيف تتوزع الإلكترونات في الذرة؟ بحث فيزيائيون وكيميائيون من دول مختلفة عن إجابات لهذه الأسئلة. لم تزودنا النتائج التي توصلوا إليها بالمعرفة عن تركيب الذرة فقط، ولكنها زودتنا بنهج جديد لفهم كل من الفيزياء والكيمياء. وأصبح تاريخ البحث في طبيعة الذرة من أكثر القصص إثارةً في القرن العشرين.

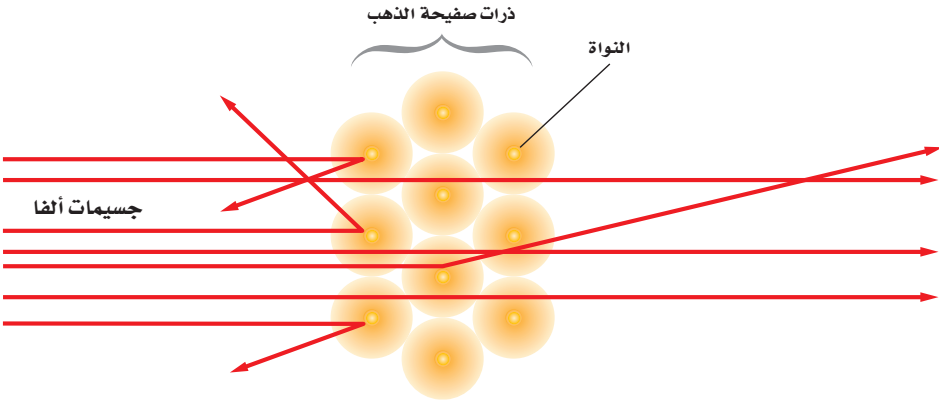
اعتقد تومسون أن المادة الثقيلة الموجبة الشحنة تملأ الذرة. وقد صوّر الإلكترونات السالبة الشحنة على أنها تتوزع خلال هذه المادة الموجبة الشحنة، تمامًا مثل حبات الزبيب في الفطيرة المسطحة. شارك العالم إرنست رذرفورد كلًّا من هانز جايجر وإرنست ماردسن، في إجراء سلسلة من التجارب، أظهرت نتائجها أن للذرة تركيبًا مختلفًا تمامًا.

أجريت تجربة رذرفورد باستخدام عناصر مشعة تصدر أشعة نافذة، وقد وجد أن بعض هذه الانبعاثات جسيمات موجبة الشحنة وثقيلة، وتتحرك بسرعات عالية. هذه الجسيمات سميت فيما بعد جسيمات ألفا، ورُمز لها بالرمز α. ويمكن الكشف عن هذه الجسيمات في تجربة رذرفورد، بوساطة ومضات ضوئية تنبعث عندما تصطدم الجسيمات مع شاشة مطلية بطبقة من كبريتات الزنك. كما يتضح من **الشكل 1–2**، فقد قذف رذرفورد حزمة من جسيمات ألفا على صفيحة رقيقة جدًّا من الذهب، وكان رذرفورد مهتمًّا بنموذج تومسون للذرة، وتوقع حدوث انحرافات بسيطة جدًّا فقط لجسيمات ألفا عندما تعبر خلال صفيحة الذهب الرقيقة، واعتقد أن مسار جسيمات ألفا الثقيلة ذات السرعة العالية سوف يتغير بمقدار ضئيل، عندما يعبر خلال الشحنة الموجبة الموزعة بانتظام والتي تكوّن كل ذرة الذهب.

وكانت نتائج التجربة مدهشة؛ فقد عبَر معظم جسيمات ألفا خلال صفيحة الذهب دون انحراف، أو مع انحراف قليل عن مسارها، إلا أن بعضها ارتدّ بزوايا كبيرة جدًّا (تزيد عن $90°$). والرسم التوضيحي لهذه النتائج موضح في **الشكل 2–2**. وقد شبه رذرفورد نتائج هذه التجربة بإرتداد قذيفة مدفع عند اصطدامها بمنديل ورقي.



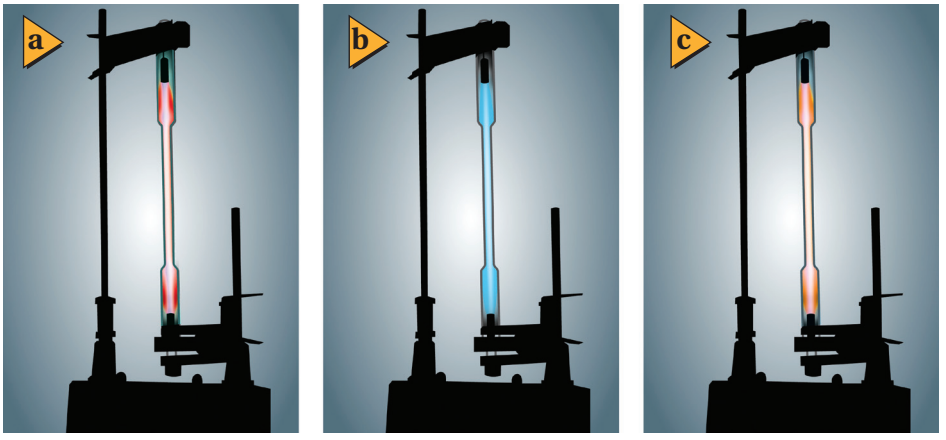
الشكل 1–2 بعد قذف صفيحة الذهب بجسيمات ألفا، استنتج فريق رذرفورد أن معظم كتلة الذرة كانت متمركزة في النواة.



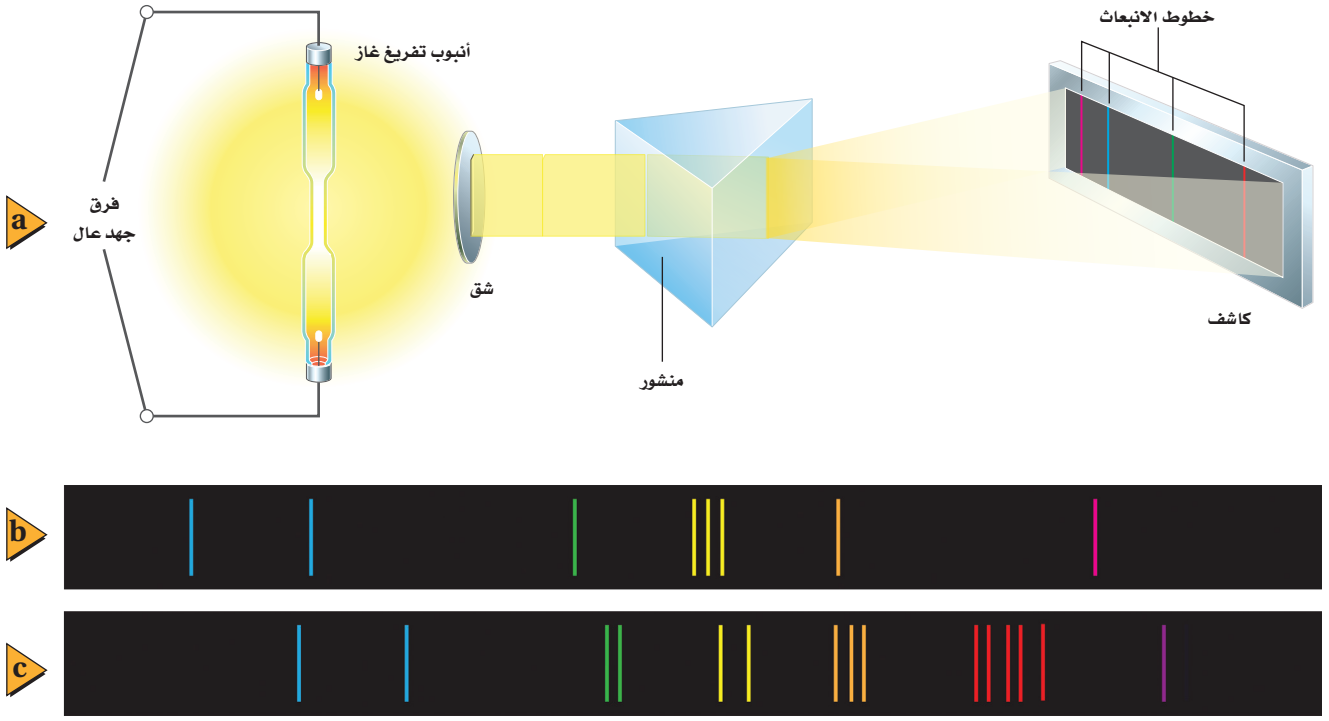
الشكل 2–2 معظم جسيمات ألفا الموجهة إلى صفيحة رقيقة من الذهب عبرت خلالها دون انحراف. وجسيم واحد من كل 20,000 يرتد بزاوية كبيرة.

مستخدمًا قانون كولوم، وقوانين نيوتن في الحركة، استنتج رذرفورد أن النتائج يمكن تفسيرها فقط، إذا كانت شحنة الذرة الموجبة متمركزة في حيز صغير وثقيل، يسمى الآن النواة. لذلك سمي نموذج رذرفورد للذرة النموذج النووي. وقد حدّد مجموعة من العلماء أن الشحنة الموجبة للذرة وأكثر من 99.9% من كتلة الذرة موجودة في النواة. أما الإلكترونات التي لا تساهم بكمية كبيرة من كتلة الذرة فتكون موزعة خارجًا وبعيدًا عن النواة. لذلك فإن الفراغ الذي تشغله الإلكترونات يحدد الحجم الكلي أو قطر الذرة. ولأن قطر الذرة أكبر 10,000 مرة تقريبًا من قطر النواة، فإن معظم حجم الذرة يكون فراغًا.

طيف الانبعاث كيف تتوزع الإلكترونات حول نواة الذرة؟ إن مجموعة الأطوال الموجية الكهرومغناطيسية التي تنبعث من الذرة تسمى طيف الانبعاث الذري، يوضح **الشكل 3–2**، التوهج المميز المنبعث عن بعض الغازات، فعند استخدام ذرات غازٍ ما وتطبيق فرق جهد عال عبر أنبوب تفريغ الغاز، نلاحظ أن الغاز بدأ بالتوهج، كما نلاحظ أن كل غاز يتوهج بضوء مختلف، وتُعد إشارات النيون الملونة التي تستخدم في بعض اللوحات الإعلانية تطبيقًا للمبادئ التي تعمل عليها أنابيب تفريغ الغاز.



الشكل 3–2 عند تطبيق فرق جهد عال على عينة غاز يبعث الغاز ضوءًا ذا توهج خاص به. يتوهج غاز الهيدروجين بضوء أحمر مزرق (**a**)، ويتوهج غاز الزئبق بضوء أزرق (**b**)، ويتوهج غاز النيتروجين بضوء برتقالي– وردي اللون(**c**).



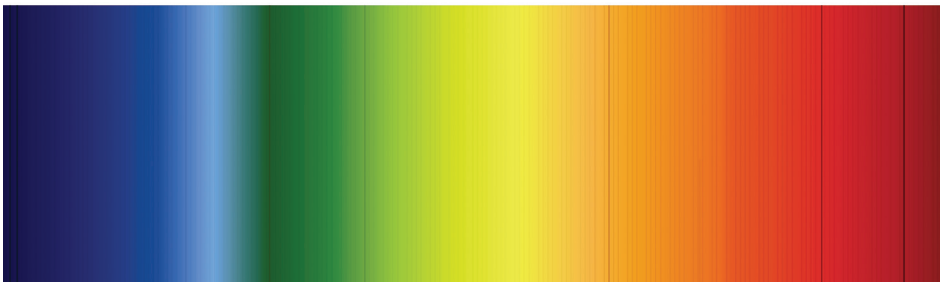
الشكل 4–2 يمكن استخدام منشور المطياف لمشاهدة طيف الانبعاث (**a**). طيفا الانبعاث الخطي للزئبق (**b**) وللباريوم (**c**) يظهران بخطوط مميزة.

نحصل على طيف الانبعاث للذرة عندما يمر الضوء المنبعث من الغاز خلال منشور أو محزوز حيود. ويمكن دراسة طيف الانبعاث بتفصيل أكبر باستخدام جهاز يسمى المطياف. وكما هو موضح في **الشكل 4a–2**، فإن الضوء في منشور المطياف يعبر خلال الشق، ثم يتشتت عندما يعبر خلال المنشور، ثم تعمل عدسة النظام – غير موضحة في الرسم – على تجميع الضوء المتشتت، لكي نتمكن من مشاهدته أو تسجيله على شاشة فوتوجرافية، أو على كاشف إلكتروني، فيكوّن المطياف صورة الشق عند مواقع مختلفة لكل طول موجي.

إن الطيف المنبعث عن جسم ساخن، أوعن مادة صلبة متوهجة، مثل فتيلة المصباح الكهربائي؛ هو حزمة متصلة من ألوان الطيف من الأحمر إلى البنفسجي ويسمى بطيف الانبعاث المستمر. لكن طيف الغاز يكون سلسلة من الخطوط المنفصلة ذات ألوان مختلفة. وخطوط طيفّي الانبعاث لغازي الزئبق والباريوم موضحان في **الشكل 4b–2** و**الشكل 4c–2** على التوالي. وكل خط ملوّن يرتبط مع الطول الموجي المحدد للضوء المنبعث من ذرات ذلك الغاز ويسمى بطيف الانبعاث الخطي.

يعدّ طيف الانبعاث الخطي وسيلة تحليلية مفيدة، فيمكن استخدامه لتحديد نوع عينة غاز مجهولة. حيث يوضع الغاز المجهول في أنبوب تفريغ الغاز ليبعث ضوءًا. والضوء المنبعث يحتوي على أطوال موجية مميّزة لذرات ذلك الغاز. لذا يمكن تحديد الغاز المجهول بمقارنة أطواله الموجية مع الأطوال الموجية الموجودة في خرائط خاصة لأطياف العناصر المعلومة.

ويمكن كذلك استخدام طيف الانبعاث؛ لتحليل خليط من الغازات. فعندما يتم تصوير طيف الانبعاث لخليط من العناصر، فإن تحليل الخطوط في الصورة يمكن أن يشير إلى نوع العناصر الموجودة والتراكيز النسبية لها. وإذا كانت العينة قيد الاختبار تحتوي على كمية أكبر من عنصر معين، فإن خطوط ذلك العنصر تكون أكثر كثافة في الصورة من العناصر الأخرى. ومن خلال إجراء المقارنة بين كثافات الخطوط، يمكن تحديد التركيب النسبي للمادة.



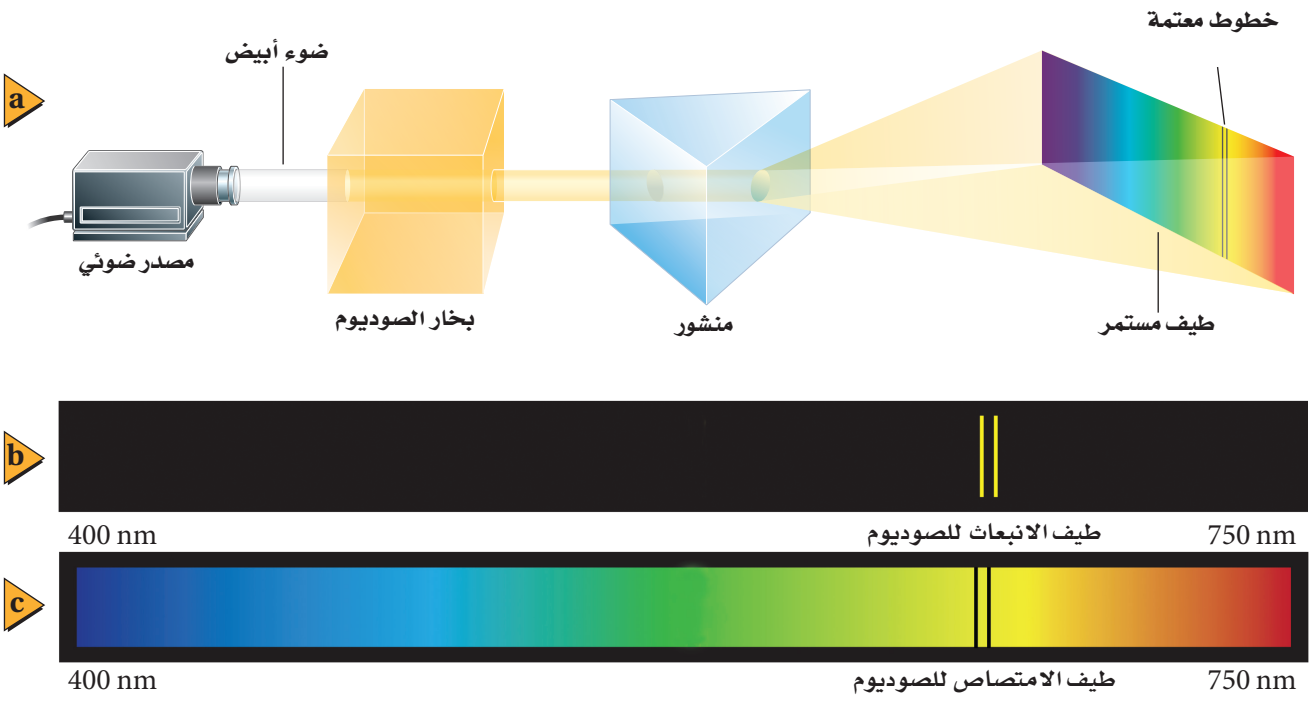
الشكل 5–2 تظهر خطوط فرونهوفر في طيف الامتصاص للشمس. توجد خطوط كثيرة، إلا أن بعض هذه الخطوط خافت وبعضها قاتم جدًا؛ اعتمادًا على تراكيز العناصر في الشمس.

الربط مع الفلك

طيف الامتصاص في عام 1814م لاحظ جوزيف فون فرونهوفر، ظهور بعض الخطوط المعتمة في طيف ضوء الشمس. تعرف هذه الخطوط المعتمة بخطوط فرونهوفر، وهي موضحة في **الشكل 5–2**. ويفسر ظهورها بأن ضوء الشمس يعبر خلال الغلاف الغازي المحيط بالشمس، وتمتص هذه الغازات أطوالاً موجية مميِّزة محددة، مما يُنتج هذه الخطوط المعتمة في الطيف المرئي. ومجموعة الأطوال الموجية الممتصة بوساطة الغاز تسمى **طيف الامتصاص** للغاز. وقد أمكن تحديد مكونات الغلاف الشمسي بمقارنة الخطوط المفقودة في الطيف المرئي بطيف الانبعاث المعلوم للعناصر المختلفة. وكذلك فقد تم تحديد مكونات العديد من النجوم باستخدام هذه التقنية.

يمكن مشاهدة طيف الامتصاص، بتمرير ضوء أبيض خلال عينة غاز ومطياف، كما هو موضح في **الشكل 6a–2**. ولأن الغاز يمتص أطوالاً موجية محددة، فإن الطيف المستمر المرئي للضوء الأبيض سيحتوي على خطوط معتمة محددة بعد مروره في غاز ما. وتحدث الخطوط المضيئة لطيف الانبعاث، والخطوط المعتمة لطيف الامتصاص لأي غاز غالبًا عند الأطوال الموجية نفسها، كما هو موضح في **الشكل 6b–2** و**الشكل 6c–2**، على التوالي، لذلك فإن العناصر الغازية الباردة تمتص الأطوال الموجية نفسها التي تبعثها عندما تثار. وكما يمكن أن تتوقع، فإنه يمكن تحديد مكونات غاز ما من الأطوال الموجية للخطوط المعتمة في طيف الامتصاص لهذا الغاز.

الشكل 6–2 يستخدم هذا الجهاز لإنتاج طيف الامتصاص لغاز الصوديوم (a). يظهر طيف الانبعاث للصوديوم على شكل خطوط مضيئة على أرضية قاتمة (b) بينما يظهر طيف الامتصاص للصوديوم على شكل خطوط معتمة في الطيف المستمر (c).



التحليل الطيفي يعدّ كل من طيفي الانبعاث والامتصاص وسائل علمية مفيدة؛ فنتيجة للأطياف المميِّزة للعنصر استطاع العلماء تحليل، وتحديد وحساب كمية المواد المجهولة، عن طريق ملاحظة الأطياف التي تبعثها أو تمتصها. ولأطياف الانبعاث والامتصاص أهمية بالغة في الصناعة، كما في البحوث العلمية. فمثلاً؛ تقوم مصانع الحديد بإعادة معالجة كميات كبيرة من حديد الخردة الذي يحوي على تراكيب مختلفة، فيتم التحديد الدقيق لهذه التراكيب خلال دقائق بوساطة التحليل الطيفي. كما ويمكن تعديل تركيب الحديد ليتناسب مع المواصفات التجارية؛ وتقوم محطات معالجة الفلزات - ومنها الألومنيوم والزنك ومعادن أخرى – بتطبيق الطريقة نفسها.

كما أستخدم علم التحليل الطيفي لتحليل الفلزات الموجودة على الأرض، وهو الأداة المتوافرة الوحيدة لدراسة مكونات النجوم.

سلبيات نموذج رذرفورد (النووي) في القرن التاسع عشر، حاول بعض العلماء استخدام الأطياف الذرية؛ لتحديد مكونات الذرة. وتمت دراسة ذرة الهيدروجين بدقة؛ لأنه العنصر الأخف، وله أبسط طيف؛ حيث يتكون الطيف المرئي للهيدروجين من أربعة أطياف خطية: الأحمر، والأخضر، والأزرق، والبنفسجي، كما هو موضح في **الشكل 7–2**. وأي نظرية علمية تفسر مكونات الذرة، يجب أن تأخذ في الحسبان هذه الأطوال الموجية، وتدعم النموذج النووي. ومع ذلك فإن النموذج النووي الذي اقترحه رذرفورد لم يخل من السلبيات؛ حيث افترض رذرفورد أن الإلكترونات تدور حول النواة تمامًا كما تدور الكواكب حول الشمس، وهذه ثغرة خطيرة في نموذجه هذا.

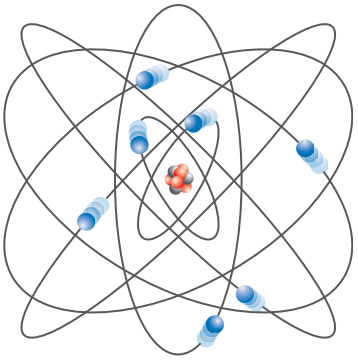
يتسارع الإلكترون في مستواه مع استمرار دورانه حول النواة، وتشع الإلكترونات المتسارعة طاقة عن طريق انبعاث موجات كهرومغناطيسية. ومعدل فَقد الإلكترون لطاقته في أثناء دورانه حول النواة يجعل مساره لولبيًّا حتى يحط أخيراً في النواة خلال 10^{-9} s، لذلك فإن نموذج رذرفورد لا يتفق مع قوانين الكهرومغناطيسية. إضافة إلى ذلك، يتوقع هذا النموذج أن الإلكترونات المتسارعة سوف تشع طاقتها عند كل الأطوال الموجية، بينما الضوء المنبعث من الذرات يُشَع عند أطوال موجية محددة فقط.

نموذج بور للذرة The Bohr Model of the Atom

عمل الفيزيائي الدنماركي نيلز بور على تحديد تركيب الذرة. وحاول توحيد النموذج النووي مع مستويات الطاقة المكماة لبلانك، ونظرية أينشتاين في الضوء. فكانت هذه فكرة جريئة؛ لأنه منذ عام 1911م لم تكن أي من هذه الأفكار الجريئة مفهومة على نطاق واسع، أو مقبولة.

الشكل 7–2 هناك أربعة خطوط في طيف الانبعاث لذرة الهيدروجين.

تكمية الطاقة بدأ بور بالنموذج النووي للإلكترونات، كما هو موضح في **الشكل 8–2**. وقدم نظرية تنص على أن قوانين الكهرومغناطيسية لا تطبق على ما في داخل الذرة. فافترض أن الإلكترونات في المدار المستقر لا تشع طاقة، رغم أنها تتسارع، واعتبر أن هذا هو شرط استقرار الذرة. وذهب إلى افتراض أن حالة الاستقرار للذرات تكون فقط عندما تكون كميات الطاقة فيها محددة. وبتعبير آخر اعتبر بور أن مستويات الطاقة في الذرة مكماة.

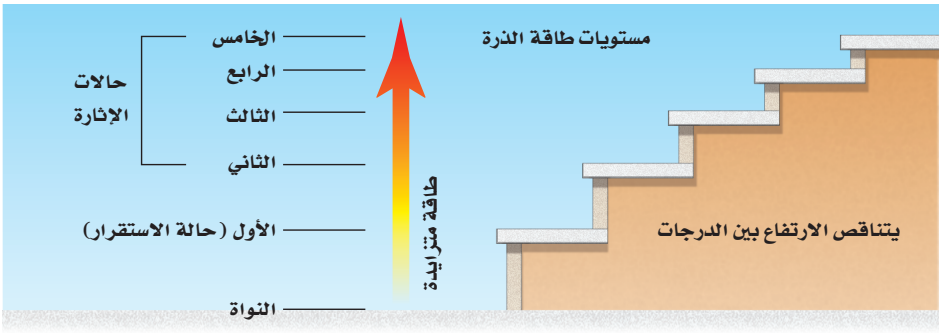


الشكل 8–2، اعتمد بور على فرضية أن الإلكترونات تدور في مدارات ثابتة حول النواة.

وكما هو موضح في **الشكل 9–2**، فإن تكمية الطاقة في الذرات يمكن تشبيهها بدرجات سلّم؛ بحيث يتناقص البعد بين كل درجتين كلما صعدنا إلى أعلى. وحتى تصعد إلى درجات أعلى للسلم، يجب أن تنتقل من درجة أدنى إلى درجة أعلى، ومن المستحيل الوقوف عند نقطة تقع بين درجتين. والذرات لها كميات مكماة من الطاقة كل منها يسمى **مستوى طاقة**، فكما أنه لا يمكنك أن تشغل مكانًا بين درجتي سلم، فإن طاقة الذرة لا يمكن أن يكون لها قيمة بين طاقتي مستويين من مستويات الطاقة المسموح بها. وعندما تكون طاقة الذرة عند أقل مقدار مسموح به، يقال إنها في **حالة استقرار**. وعندما تمتص الذرة كمية محددة من الطاقة، فإنها تنتقل إلى مستوى طاقة أعلى، أي مستوى طاقة أعلى من مستوى الاستقرار. وهذه الحالة تسمى **حالة الإثارة**.

طاقة الذرة ما الذي يحدد طاقة الذرة؟ طاقة الذرة تساوي مجموع طاقة حركة الإلكترونات، وطاقة الوضع الناتجة عن قوة التجاذب بين الإلكترونات والنواة. وطاقة الإلكترون في المستويات القريبة من النواة أقل من طاقة الإلكترون في المستويات البعيدة عنها؛ لأنه يجب أن يبذل شغل لنقل الإلكترونات بعيدًا عن النواة. وهكذا تكون الذرات في حالة إثارة عندما تكون إلكتروناتها عند مستويات طاقة أعلى، أي في مستويات أبعد عن النواة. ولأن الطاقة مكماة وترتبط برقم المستوى، فإن طاقة المستوى مكماة أيضًا. يعرف نموذج الذرة الذي يبين وجود نواة مركزية وإلكترونات لها مستويات طاقة مكماة تدور حولها بنموذج بور للذرة.

إن الذرات المستقرة – حسب هذا النموذج – لا تبعث طاقة، فمن المسؤول إذًا عن طيف الانبعاث المميِّز للذرة؟ للإجابة عن هذا السؤال، اقترح بور أن طاقة كهرومغناطيسية تنبعث عندما تتغير حالة الذرة من حالة استقرار إلى حالة استقرار أخرى. ومن نظرية التأثير الكهروضوئي لأينشتاين، أدرك بور أن طاقة كل فوتون تعطى بالمعادلة $E_{\text{فوتون}} = hf$، ثم افتَرَض أنه عندما تمتص الذرة فوتونًا، فإنها تصبح مثارة، وتزداد طاقتها بمقدار يساوي طاقة ذلك الفوتون، ثم تنتقل هذه الذرة المثارة إلى مستوى طاقة أقل عندما تشع فوتون.



الشكل 9–2 هذه الدرجات التي يتناقص البعد بينها تماثل مستويات الطاقة المتاحة في الذرة. لاحظ كيف أن فرق الطاقة بين مستويات الطاقة المتجاورة يتناقص كلما زاد بعد مستوى الطاقة عن النواة.

عندما يحدث انتقال في الذرة من مستوى طاقة ابتدائي E_i، إلى مستوى طاقة نهائي E_f فإن التغير في طاقة الذرة ΔE يعطى بالمعادلة:

$$\Delta E_{\text{ذرة}} = E_f - E_i$$

كما هو موضح في **الشكل 10–2**، فإن التغير في طاقة الذرة يساوي طاقة الفوتون المنبعث.

$$E_{\text{فوتون}} = |\Delta E|_{\text{ذرة}}$$

أو

$$E_{\text{فوتون}} = |E_f - E_i|$$

تلخّص المعادلات أدناه العلاقات بين التغير في حالات الطاقة للذرة، وطاقة الفوتون المنبعث.

$$E_{1\,\text{فوتون}} = |E_1 - E_3|$$

$$E_{2\,\text{فوتون}} = |E_1 - E_2|$$

$$E_{3\,\text{فوتون}} = |E_2 - E_3|$$

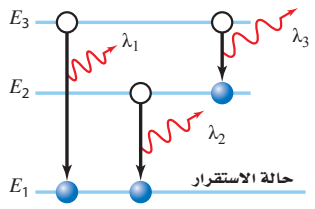
$$E_{1\,\text{فوتون}} > E_{2\,\text{فوتون}} > E_{3\,\text{فوتون}}$$

$$\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$$

طاقة الفوتون المنبعث

طاقة الفوتون المنبعث، تساوي حاصل ضرب ثابت بلانك في تردد الفوتون المنبعث.
طاقة الفوتون المنبعث تساوي النقص في طاقة الذرة.

$$E_{\text{فوتون}} = \Delta E_{\text{ذرة}} \quad \text{أو} \quad E_{\text{فوتون}} = hf$$



الشكل 10–2 طاقة الفوتون المنبعث تساوي الفرق في الطاقة بين مستويات الطاقة الابتدائية، والنهائية للذرة.

تنبؤات نموذج بور Predictions of the Bohr Model

استخدم بور نظريته لحساب الأطوال الموجية للضوء المنبعث من ذرة الهيدروجين، فكانت الحسابات متوافقة تمامًا مع قيم مقيسة حددها علماء آخرون. ونتيجة ذلك تم قبول نموذج بور على نطاقٍ واسع. لكن لسوء الحظ فقد انطبق هذا النموذج على ذرة الهيدروجين فقط، ولم يكن باستطاعته توقع طيف الهيليوم الذي يمثل العنصر البسيط التالي بعد الهيدروجين. إضافة إلى ذلك، لم يقدم النموذج تفسيرًا جيدًا لبعض المسائل، مثل لماذا يمكن تطبيق قوانين الكهرومغناطيسية في كل مكان، إلا داخل الذرة. لذلك لم يكن بور نفسه يعتقد أن نموذجه يمثل نظرية متكاملة عن تركيب الذرة. وعلى الرغم من عيوب نموذج بور، فإنه يصف مستويات الطاقة والأطوال الموجية للضوء المنبعث، والممتص من ذرات الهيدروجين بصورة جيدة.

تطوّر نموذج بور طوّر بور نموذجه بتطبيق قانون نيوتن الثاني في الحركة $F_{\text{محصلة}} = ma$ على الإلكترون، والقوة المحصلة المحسوبة، بوساطة قانون كولوم للتفاعل بين الإلكترون ذي الشحنة $-q$ والبروتون ذي الشحنة $+q$ على بعد r احدهما من الآخر؛ حيث تحسب القوة بالمعادلة: $F = Kq^2/r^2$. إن تسارع الإلكترون في مدار دائري حول البروتون الذي كتلته أكبر كثيرًا من كتلة الإلكترون يعطى بالمعادلة: $a = v^2/r$. وهكذا حصل بور على العلاقة:

$$F_{\text{كهربائية}} = F_{\text{مركزية}}$$

$$\frac{Kq^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

في المعادلة أعلاه K، تمثل ثابت كولوم، وقيمته $9.0 \times 10^9\ \text{N.m}^2/\text{C}^2$

أخذ بور بعد ذلك في الحسبان الزخم الزاوي للإلكترون الذي يدور حول النواة، والذي يساوي حاصل ضرب الزخم الخطي للإلكترون mv في نصف قطر مساره الدائريّ r، فتوصل إلى أن الزخم الزاوي للإلكترون يعطى بالعلاقة mvr. ثم افترض أن الزخم الزاوي للإلكترون له قيم محددة، وأن تلك القيم المسموح بها تكون مضروبة في المقدار $h/2\pi$؛ حيث h ثابت بلانك. وباستخدام n لتمثل عددًا صحيحًا، اقترح بور أن $mvr_n = nh/2\pi$. وباستخدام العلاقة $\frac{Kq^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$ وإعادة ترتيب معادلة الزخم الزاوي، وجد بور أن أنصاف أقطار مستوَيات الإلكترونات في ذرة الهيدروجين تعطى بالمعادلة:

نصف قطر مستوى إلكترون ذرة الهيدروجين

إن نصف قطر مستوى n للإلكترون يساوي حاصل ضرب مربع ثابت بلانك في مربع العدد الصحيح n مقسومًا على الكمية المتكوّنة من حاصل ضرب 4 ومربع π، مضروبة في الثابت K، مضروبة بكتلة الإلكترون ومربع شحنته.

$$r_n = \frac{h^2n^2}{4\pi^2Kmq^2}$$

تستطيع حساب نصف قطر المستوى الأقرب إلى النواة في ذرة الهيدروجين – الذي يعرف أيضًا بنصف قطر بور - وذلك بتعويض القيم المعلومة وقيمة $n = 1$ في المعادلة أعلاه.

$$r_1 = \frac{(6.626\times10^{-34}\ \text{J.s})^2(1)^2}{4\pi^2(9.0\times10^9\ \text{N.m}^2/\text{C}^2)(9.11\times10^{-31}\ \text{kg})(1.60\times10^{-19}\text{C})^2}$$

$$= 5.3\times10^{-11}\ \text{J}^2.\ \text{s}^2/\text{N.}\ \text{m}^2.\ \text{kg}$$

$$= 5.3\times10^{-11}\ \text{m} \quad \text{أو}\ 0.053\ \text{nm}$$

وبصورة عامة فإن نصف قطر أي مدار مسموح به في ذرة الهيدروجين يعطي من العلاقة:

$$r_n = 5.3\times10^{-11}\ n^2\ \text{m}$$

كما أن الطاقة الكلية للذرة يعبر عنها بحاصل جمع طاقة حركة الإلكترون، وطاقة وضعه، وتعطى بالمعادلة: $-Kq^2/2r$ وتمثل بالمعادلة:

$$E_n = -\frac{2\pi^2K^2mq^4}{h^2}\times\frac{1}{n^2}$$

ويمكن حساب طاقة ذرة الهيدروجين بالعلاقة:

طاقة ذرة الهيدروجين

الطاقة الكلية بوحدة الإلكترون فولت لذرة عدد الكم الرئيسي لها n، تساوي حاصل قسمة -13.6 على n^2.

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2}\text{eV}$$

إن كلًّا من نصف قطر المستوى للإلكترون وطاقة الذرة مكماة. ويسمى العدد الصحيح n الذي يظهر في المعادلات **عدد الكم الرئيس**، ويمكن من خلاله حساب القيم المكماة لكل من r و E.

تجربة

طيف الضوء اللامع (الساطع)

شغل مصدر القدرة المتصل مع أنبوب تفريغ الغاز بحيث يضيء الأنبوب.

تحذير: احمل أنبوب الغاز بحذر شديد لتتجنب تحطمه، ولا تلمس أي فلز معرضًا للإضاءة في أثناء تشغيل مصدر القدرة؛ لأن فرق الجهد المستخدم خطر. وقم دائمًا بفصل مصدر القدرة قبل تغيير أنابيب الغاز.

أطفئ أنوار الغرفة

1. **صف** اللون الذي تلاحظه.
2. **لاحظ** أنبوب غاز التفريغ من خلال محزوز الحيود.
3. **اختبر** نتائج مشاهدة أنبوب غاز التفريغ من خلال محزوز الحيود.
4. **توقع** ما إذا كان الطيف الملاحظ سيتغير عندما تتم مشاهدة أنبوب غاز التفريغ من خلال محزوز الحيود.
5. **اختبر** توقعاتك.

التحليل والاستنتاج

6. **اختبر** نتائج مشاهدة أنبوب غاز التفريغ من خلال محزوز الحيود.
7. **فسر** سبب وجود اختلاف بين الطيفين.

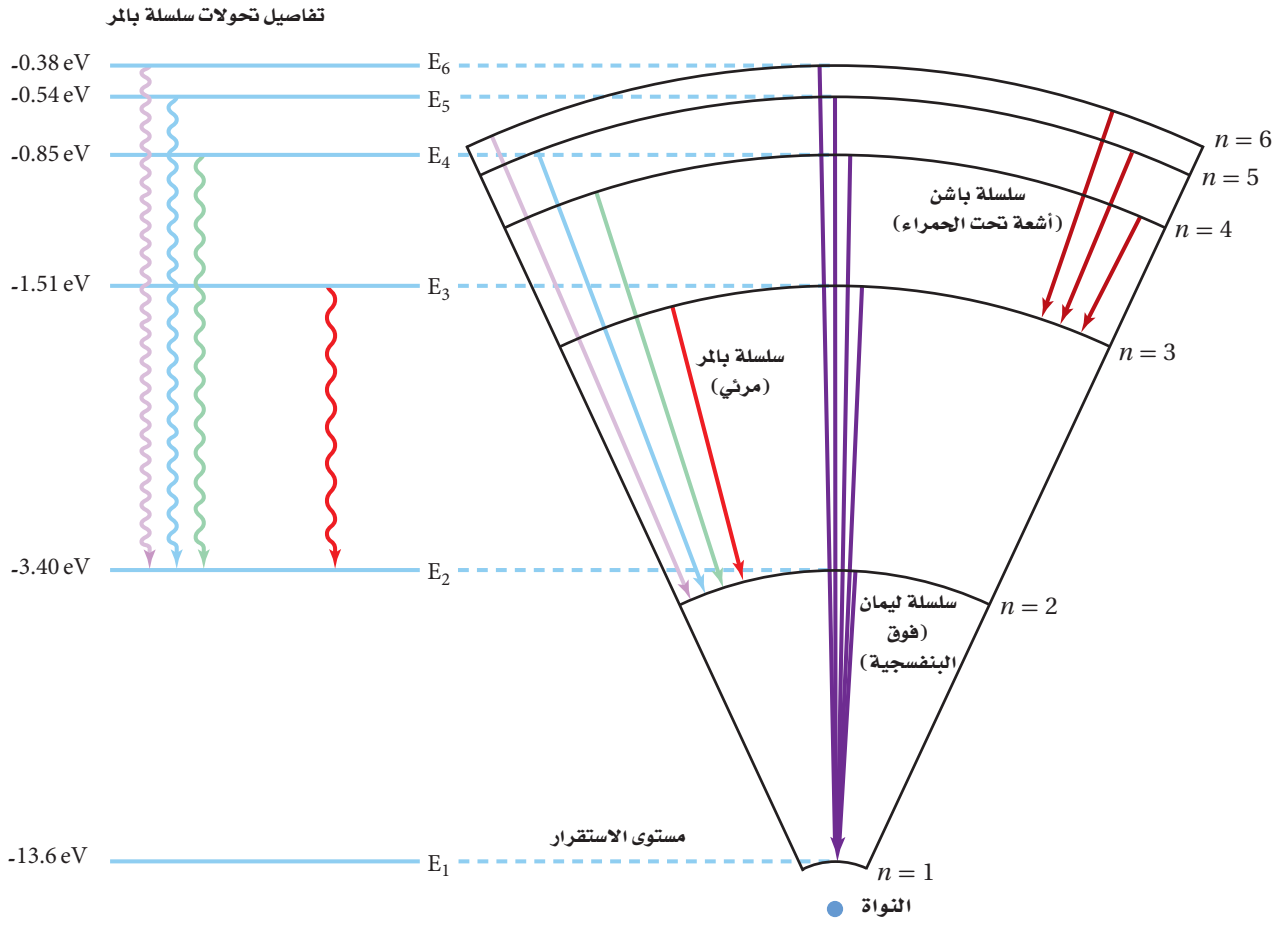
الطاقة وانتقال الإلكترون ربما تتساءل، لماذا تكون طاقة الذرة في نموذج بور ذات قيمة سالبة؟ تذكر مما درست أن فروق الطاقة فقط تكون ذات معنى. وطاقة مستوى اللانهاية يمكن اعتبارها صفرًا، وتسمى الطاقة الصفرية، وتعرّف بأنها طاقة الذرة عندما يكون الإلكترون بعيدًا جدًّا عن الذرة، وليس له طاقة حركة. وتحدث هذه الحالة عندما تصبح الذرة متأينة، أي عندما يُنزع الكترون من الذرة. ولأنه يجب بذل شغل لتأيين الذرة، فإن طاقة الذرة مع الإلكترون الدائر فيها يجب أن يكون أقل من صفر، لذلك فإن طاقة الذرة ذات قيمة سالبة. وعندما يحدث انتقال في الذرة من مستوى طاقة أقل إلى مستوى طاقة أعلى، فإن الطاقة الكلية تصبح أقل سالبية، ولكن مجموع التغير الكلي في الطاقة يبقى موجبًا.

بعض مستويات الطاقة لذرة الهيدروجين، ومستويات الطاقة التي قد يتم الانتقال إليها وفقاً لسلاسلها والموضّحة في **الشكل 11–2**. لاحظ أن ذرة الهيدروجين المثارة يمكنها أن تبعث مدى واسعًا من الطاقة الكهرومغناطيسية، كالأشعة تحت الحمراء، والضوء المرئي، أو الأشعة البنفسجية بحسب حالات الانتقال التي تحدث؛ حيث تنبعث الأشعة فوق البنفسجية عندما ينتقل إلكترون من مستوى حالة الإثارة إلى مستوى الطاقة الأول. وتنتج الخطوط الأربعة المرئية في طيف الهيدروجين، عندما يحدث الانتقال في الذرة من مستوى الطاقة $n = 3$ أو مستوى أعلى، إلى مستوى الطاقة $n = 2$.

التجربة العملية:

كيف يمكن قياس عدد خطوط الطيف المنبعثة عند انتقال الإلكترون بين مستويات الطاقة المختلفة؟

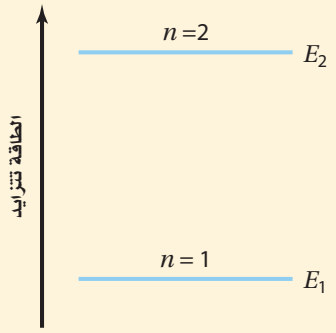
الشكل 11–2 تعرف مجموعة الخطوط الملونة التي تكوّن طيف ذرة الهيدروجين المرئي بسلسلة بالمر. إن هذا الضوء المرئي ناتج عن الفوتونات المنبعثة عندما تعود الإلكترونات إلى مستوى الطاقة الثاني $n = 2$. وتنبعث الأشعة فوق البنفسجية (سلسلة ليمان) عندما تعود الإلكترونات إلى مستوى الطاقة الأول، وتنبعث الأشعة تحت الحمراء (سلسلة باشن) عندما تعود الإلكترونات إلى مستوى الطاقة الثالث $n=3$.



مثـــال 1

مستويات الطاقة عندما تمتص ذرة الهيدروجين كمية محددة من الطاقة، فإنها تسبب انتقال إلكترونها من مستوى الطاقة الأدنى إلى مستوى طاقة أعلى، احسب طاقة كل من مستوى الطاقة الأول ومستوى الطاقة الثاني، ثم احسب الطاقة الممتصة بوساطة الذرة.

1 تحليل المسألة ورسمها



- مثّل بالرسم مستويات الطاقة E_1 و E_2.
- وضح اتجاه تزايد الطاقة في الرسم التوضيحي.

المعلوم	المجهول
عدد الكم لمستوى الطاقة الأول $n=1$	$E_1 = ؟$
عدد الكم لمستوى الطاقة الثاني $n=2$	$E_2 = ؟$
	$\Delta E = ؟$

2 إيجاد الكمية المجهولة

استخدم معادلة طاقة الإلكترون في مستواه، لحساب طاقة كل مستوى.

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2}\text{ eV}$$

بالتعويض عن $n = 1$

$$E_1 = -\frac{13.6}{(1)^2}\text{ eV}$$

$$E_1 = -13.6\text{ eV}$$

$$E_2 = -\frac{13.6}{(2)^2}\text{ eV}$$

$$E_2 = -3.40\text{ eV}$$

إن الطاقة الممتصة بوساطة الذرة ΔE، تساوي فرق الطاقة بين مستوى الطاقة النهائي للذرة E_f ومستوى الطاقة الأوليّ للذرة E_i.

بالتعويض عن $E_f = E_2$ ، $E_i = E_1$

بالتعويض عن $E_2 = -3.40$ eV ، $E_1 = -13.6$ eV

$$\Delta E = E_f - E_i$$

$$= E_2 - E_1$$

$$= -3.40\text{ eV} - (-13.6\text{ eV})$$

$$= 10.2\text{ eV}$$ الطاقة الممتصة

3 تقويم الجواب

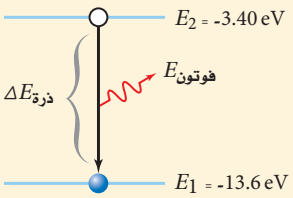
- **هل الوحدات صحيحة؟** إن قيم طاقة المستويات يجب أن تقاس بوحدة الإلكترون فولت.
- **هل الإشارة صحيحة؟** إن فرق الطاقة موجب عندما تتحرك الإلكترونات من مستويات طاقة منخفضة إلى مستويات طاقة أعلى.
- **هل الجواب منطقي؟** إن الطاقة اللازمة لتحريك إلكترون من مستوى الطاقة الأول إلى مستوى الطاقة الثاني يجب أن يساوي 10 eV تقريبًا، وهذا يساوي الطاقة المطلوبة.

مثـــــال 2

تردد وطول موجة الفوتونات المنبعثة ينتقل إلكترون ذرة هيدروجين مثارة من مستوى الطاقة الثاني $n = 2$، إلى مستوى الطاقة الأول $n = 1$؛ احسب الطاقة والطول الموجي للفوتون المنبعث. استخدم قيم E_1 و E_2 من المثال 1.

1 تحليل المسألة ورسمها

- ارسم رسمًا توضيحيًّا مستويات الطاقة E_1 و E_2 .
- وضّح اتجاه تزايد الطاقة، ووضح انبعاث الفوتون في الرسم.



المعلوم	المجهول
$E_1 = -13.6$ eV	$f = ؟$
$E_2 = -3.40$ eV	$\lambda = ؟$
	$\Delta E = ؟$

2 إيجاد الكمية المجهولة

طاقة الفوتون المنبعث تساوي ΔE، فرق الطاقة بين مستوى الطاقة الثاني للذرة E_f، ومستوى الطاقة الأول لها E_i.

$$\Delta E = E_f - E_i$$

بالتعويض عن $E_i = E_2$ ، $E_f = E_1$

$$= E_1 - E_2$$

بالتعويض عن $E_2 = -3.40$ eV ، $E_1 = -13.6$ eV

$$= -13.6 \text{ eV} - (-3.40 \text{ eV})$$

$$= -10.2 \text{ eV}$$ الطاقة المنبعثة

لحساب الطول الموجي للفوتون، استخدم المعادلات الآتية:

حل معادلة الفوتون بالنسبة للتردد

$$|\Delta E| = hf \text{ ، لذا فإن } f = \frac{|\Delta E|}{h}$$

حل معادلة الطول الموجي - التردد بالنسبة للطول الموجي

$$c = \lambda f \text{ ، لذا فإن } \lambda = \frac{c}{f}$$

بالتعويض عن $f = \frac{|\Delta E|}{h}$

$$\lambda = \frac{c}{(|\Delta E|/h)}$$

بالتعويض عن $|\Delta E| = 10.2$ eV ، $hc = 1240$ eV.nm

$$= \frac{1240 \text{ eV. nm}}{10.2 \text{ eV}}$$

$$= 122 \text{ nm}$$

3 تقويم الجواب

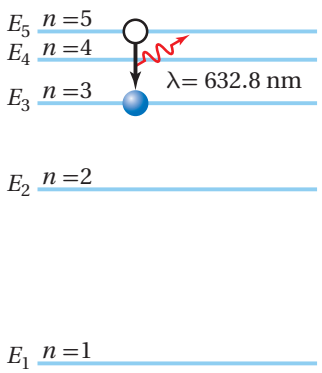
- **هل الوحدات صحيحة؟** تقاس الطاقة بوحدة الإلكترون فولت. البادئة نانو تعدّل إلى وحدة متر، وهي وحدة القياس الأساسية في النظام الدولي للوحدات SI. والتي تمثل الوحدة الصحيحة للطول الموجي.
- **هل الإشارة صحيحة؟** تنتج الطاقة عندما تبعث الذرة فوتونًا خلال عملية الانتقال من مستوى الطاقة الثاني إلى مستوى الطاقة الأول، ولذلك فإن فرق الطاقة سالب.
- **هل الجواب منطقي؟** الطاقة الناتجة عن عملية الانتقال تنتج ضوءًا في مدى الأشعة فوق البنفسجية، وهو أقل من 400 nm

مسائل تدريبية

1. احسب فرق الطاقة بين مستوى الطاقة E_3 ومستوى الطاقة E_2 في ذرة الهيدروجين.
2. قطر نواة ذرة الهيدروجين 2.5×10^{-15} m، والمسافة بين مركز النواة والإلكترون الأول 5×10^{-11} m تقريبًا. إذا استخدمت كرة قطرها 7.5 cm لتمثل النواة فكم يكون بُعد الإلكترون؟
3. في عملية انتقال محدد، تسقط طاقة ذرة الزئبق من مستوى طاقة 8.82 eV إلى مستوى طاقة 6.67 eV احسب:
   a. طاقة الفوتون المنبعث من ذرة الزئبق.
   b. الطول الموجي للفوتون المنبعث من ذرة الزئبق.

مسألة تحدٍّ

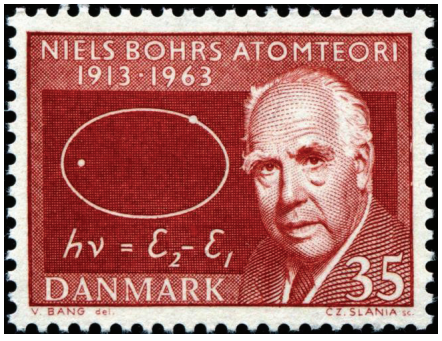
على الرغم من تفسير نموذج بور للذرة، وبدقة لسلوك ذرة الهيدروجين، إلا أنه لم يكن قادرًا على تفسير سلوك أي ذرة أخرى. تحقق من جوانب القصور في نموذج بور؛ وذلك بتحليل انتقال إلكترون في ذرة النيون. فخلافًا لذرة الهيدروجين، فإن لذرة النيون عشرة إلكترونات، وأحد هذه الإلكترونات ينتقل بين مستوى الطاقة $n = 5$، ومستوى الطاقة $n = 3$، باعثًا فوتونًا في هذه العملية.



1. اعتبر أنه يمكن معاملة إلكترون ذرة النيون، كإلكترون في ذرة الهيدروجين، فما طاقة الفوتون التي يتوقعها نموذج بور؟
2. اعتبر أنه يمكن معاملة إلكترون ذرة النيون، كإلكترون في ذرة الهيدروجين، فما الطول الموجي الذي يتنبأ به نموذج بور؟
3. الطول الموجي الحقيقي للفوتون المنبعث خلال عملية الانتقال 632.8 nm، ما نسبة الخطأ المئوي لتنبؤ نموذج بور للطول الموجي للفوتون؟

يعدّ نموذج بور الأساس الذي مكّن العلماء من فهم تركيب الذرة، بالإضافة إلى حساب طيف الانبعاث، كان بور وطلبته قادرين على حساب طاقة التأين لذرة الهيدروجين. وطاقة تأين الذرة هي الطاقة اللازمة لتحرير إلكترون بصورة كاملة من الذرة وقد اتفقت طاقة التأين المحسوبة بصورة كبيرة مع النتائج العملية. وقدم نموذج بور أيضًا توضيحًا لبعض الخصائص الكيميائية للعناصر. إن الفكرة التي تبيّن أن للذرات ترتيبات إلكترونية خاصة بكل عنصر، تعدّ الأساس لمعظم معرفتنا بالتفاعلات والروابط الكيميائية.

حاز العالم نيلز بور على جائزة نوبل عام 1922م وتم تخليد إنجازاته في إصدار بعض الطوابع البريدية الموضحة في **الشكل 12–2** .



الشكل 12–2 التكريم في هذه الطوابع البريدية من الدنمارك، والسويد؛ فقد ساهمت إنجازات نيلز بور العظيمة على فهمنا للذرة، وقد حصل بها على اعتراف عالمي وعلى جائزة نوبل.

2–1 مراجعة

4. **نموذج رذرفورد النووي** لخص تركيب الذرة بناء على نموذج رذرفورد النووي.
5. **الأطياف** فيم تختلف أطياف الانبعاث الذرية للمواد الصلبة المتوهجة والغازات، وفيم تتشابه؟
6. **نموذج بور** فسّر كيف تحفظ الطاقة عندما تمتص ذرة فوتون ضوء؟
7. **نصف قطر المستوى** يسلك أيون الهيليوم سلوك ذرة الهيدروجين، ونصف قطر مستوى طاقة الأيون الأدنى يساوي 0.0265 nm، اعتمادًا على نموذج بور، ما مقدار نصف قطر مستوى الطاقة الثاني؟
8. **طيف الامتصاص** وضح كيفية الحصول على طيف الامتصاص لغاز ما. وضح أسباب ظهور الطيف.
9. **نموذج بور** تم الكشف عن تحوّل ذرة الهيدروجين من مستوى الطاقة 101، إلى مستوى الطاقة 100، ما مقدار الطول الموجي للإشعاع؟ أين يقع هذا الانبعاث في الطيف الكهرومغناطيسي؟
10. **التفكير الناقد** نصف قطر نواة ذرة الهيدروجين 1.5×10^{-15} m تقريبًا. إذا كنت راغبًا في بناء نموذج لذرة الهيدروجين، باستخدام كرة بلاستيك ($r = 5$ cm) تمثل النواة، فأين تضع إلكترونًا في مستوى $n = 1$؟ هل يكون موقعه في غرفة صفك؟

لم يكن بالإمكان تفسير الفرضيات التي قدمها بور على أساس المبادئ الفيزيائية المقبولة في تلك الفترة؛ فالنظرية الكهرومغناطيسية مثلاً، تتطلب أن تبعث الجسيمات المتسارعة طاقة، مما يؤدي إلى إنهيار سريع للذرة. كما أن الفكرة التي تقول إن الإلكترون الذي يدور له مستوى طاقة محدد، بنصف قطر معين، تتعارض مع مبدأ عدم التحديد لهيزنبرج. فكيف يمكن وضع نموذج بور على أساس متين؟

من مستويات الطاقة إلى السحابة الإلكترونية

From Orbits to an Electron Cloud

تذكر من الفصل السابق أن دي برولي اقترح أن للجسيمات خصائص موجية، تمامًا كما للضوء خصائص جسيمية، كما اقترح تطبيق فرضيته على ذرة الهيدروجين، وذلك بأن الالكترون الذي يدور حول النواه في مسار دائري تصاحبه موجات، يمكن حساب طول موجة دي برولي لجسيم زخمه الخطي $m\,v$ باستخدام المعادلة: $\lambda = \frac{h}{mv}$ وبضرب طرفي المعادلة بنصف قطر المستوى r نحصل على الرخم الزاوي من المعادلة: $mvr = \frac{hr}{\lambda}$ ، وبحسب نموذج بور، فإن للزخم الزاوي قيمًا محددة تعطى من المعادلة: $mvr = \frac{nh}{2\pi}$، وبمساواة المعادلتين نحصل على: $n\lambda = 2\pi r$

أي أن محيط مستوى الطاقة في نموذج بور $2\pi r$ يساوي العدد الصحيح n مضروبًا في طول موجة دي برولي λ، وإلا فإنها ستتداخل تداخلًا هدميًا وتلغي بعضها، و**الشكل 13–2** يوضح ذلك؛ لذا فإن **النموذج الكمي** يتوقع احتمالية وجود الإلكترون في منطقة محددة فقط. ومن المثير للاهتمام أن النموذج الكمي للذرة تنبأ بأن المسافة الأكثر احتمالية بين الإلكترون والنواة لذرة الهيدروجين، هي نصف القطر نفسه الذي تم توقعه من خلال نموذج بور.

الفيزياء في حياتك:

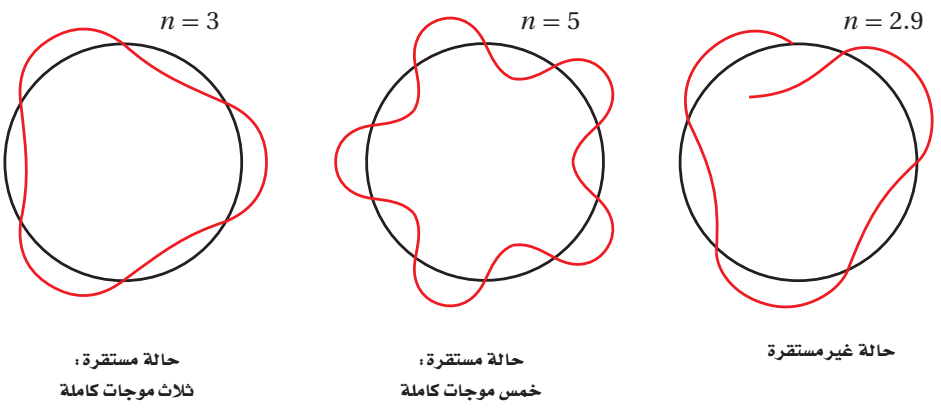
في كل مرة تلعب فيها لعبة فيديو، فإنك تستخدم التكنولوجيا التي أصبحت ممكنة بفضل التطبيقات الإبداعية لميكانيكا الكم. على سبيل المثال، أصبح الليزر المستخدم لقراءة قرص اللعبة ممكنًا بفضل فهم الفيزيائيين للنموذج الكمي للذرة.

تساؤلات جوهرية:

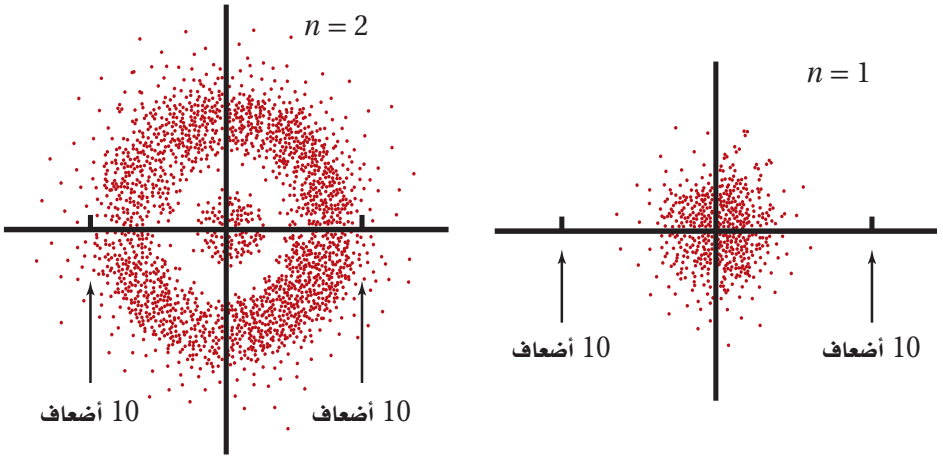
- ما هي خصائص النموذج الكمي للذرة؟
- كيف يعمل الليزر؟
- ما هي خصائص ضوء الليزر؟

المفردات:

- جسيمات ألفا
- طيف الامتصاص
- حالة الاستقرار
- عدد الكم الرئيس
- نيوكليون
- مستوى الطاقة
- حالة الإثارة



الشكل 13–2 للإلكترون الذي له مستوى مستقر حول النواة محيط يساوي حاصل ضرب العدد الصحيح n في طول موجة دي برولي. لاحظ أن العدد الصحيح $n = 3$ و $n = 5$ مستقران، بينما $n = 2.9$ غير مستقر.



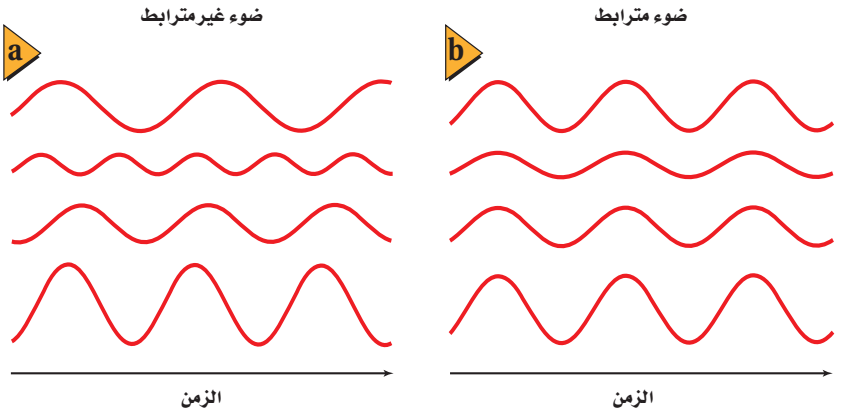
الشكل 14–2 هذه الرسومات تظهر احتمالية وجود الإلكترون في ذرة الهيدروجين عند مسافة تساوي عشرة أضعاف نصف قطر بور من النواة لكل من مستويي الطاقة الأول والثاني. كثافة توزيع النقاط ترتبط مع احتمالية وجود الإلكترون.

إن احتمالية وجود الإلكترون عند نصف قطر محدد يمكن حسابه ، وكذلك يمكن تكوين تمثيل ثلاثي الأبعاد لتوضيح مناطق الاحتمالات المتساوية. والمنطقة ذات الاحتمالية العالية لوجود الإلكترون فيها تسمى **سحابة إلكترونية**. و**الشكل 14–2** يوضح مقطعًا لسحابة إلكترونية تمثل حالتي الطاقة الأقل في ذرة الهيدروجين.

وعلى الرغم من صعوبة تصور النموذج الكمي للذرة، فإن **ميكانيكا الكم** - وهي دراسة خصائص المادة باستخدام خصائصها الموجية– قد حققت نجاحًا هائلاً في توقع الكثير من المعلومات التفصيلية لتركيب الذرة. لكن ميكانيكا الكم تمكنت من جعل تراكيب بعض الجزيئات قابلة للحساب، مما أتاح للكيميائيين القدرة على تحديد ترتيب الذرات في الجزيئات وتحضير جزيئات جديدة ومفيدة لم تكن موجودة أصلاً في الطبيعة. وتستخدم ميكانيكا الكم أيضًا؛ لتحليل تفاصيل امتصاص وانبعاث الضوء من الذرات. ونتيجة لنظرية ميكانيكا الكم، تم تطوير مصدر جديد للضوء وهو الليزر.

الليزر Light amplification by stimulated emission of radiaion

كما تعلم، فإن الضوء المنبعث عن مصدر متوهج يتكون من سلسلة متتالية من الأطوال الموجية، في حين أن الضوء الناتج عن الغاز الذري يتكون من بعض الأطوال الموجية المميزة للغاز. إن الضوء المنبعث من كلا المصدرين ينتقل في جميع الاتجاهات. وبالإضافة إلى ذلك فإنه ليس من الضرورة أن تنتقل الموجات الضوئية المنبعثة بالطور نفسه. وتذكّر مما درسته سابقًا، أن الموجات التي تنتقل بالطور نفسه وتتوافق في القمم والقيعان تكون مترابطة. ويوضح **الشكل 15–2** نوعي هذه الموجات.

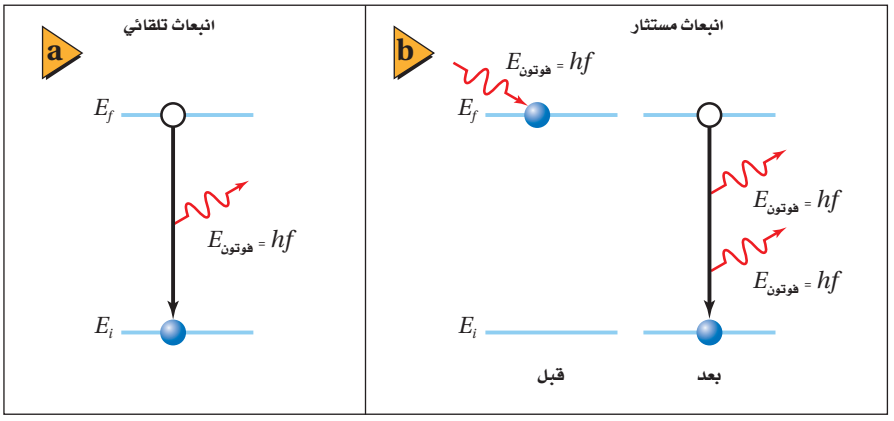


■ **الشكل 15–2** يوضح موجات الضوء غير المترابطة (a) وموجات الضوء المترابطة (b).

ينبعث الضوء من الذرات المثارة. وقد درست حتى الآن طريقتين يمكن أن تثار بهما الذرات، وهما الإثارة الحرارية، وتصادم الإلكترون. لكن يمكن للذرات أن تثار أيضًا نتيجة تصادمها مع فوتونات ذات طاقة محددة.

الانبعاث التلقائي ماذا يحدث بعد أن تصبح الذرة في حالة إثارة؟ تعود الذرة بعد وقت قصير عادة إلى حالتها المستقرة، باعثة فوتونًا له الطاقة نفسها التي كان قد امتصها، كما هو موضح في **الشكل 16a–2**، وهذه العملية تسمى الانبعاث التلقائي.

الانبعاث المستثار فكّر أينشتاين عام 1917م فيما يحدث لذرة مثارة أصلاً، اصطدم بها فوتون طاقته تساوي فرق الطاقة بين حالة الإثارة وحالة مستقرة، فبيّن حينها أن هذه الحالة للذرة تسمى **الانبعاث المستثار**؛ حيث تعود الذرة إلى الحالة المستقرة، وتبعث بفوتون طاقته تساوي فرق الطاقة بين الحالتين. بينما لا يتأثر الفوتون الذي سبّب أو استثار الانبعاث. ثم يغادران الذرة معًا ليس بالتردد نفسه فقط، بل يكون لهما الطور نفسه، ويكونان مترابطان كذلك كما هو موضح في **الشكل 16b–2**، وقد يصطدم أي من هذين الفوتونين بذرات أخرى مثارة، ومن ثم ينتج فوتونات أخرى؛ بحيث يكون لها الطور نفسه مع الفوتونات الأصلية. وقد تستمر هذه العملية، منتجة سيلاً من الفوتونات التي لها الطول الموجي نفسه حيث يكون لها جميعا حدود قصوى، وحدود دنيا في اللحظة نفسها.

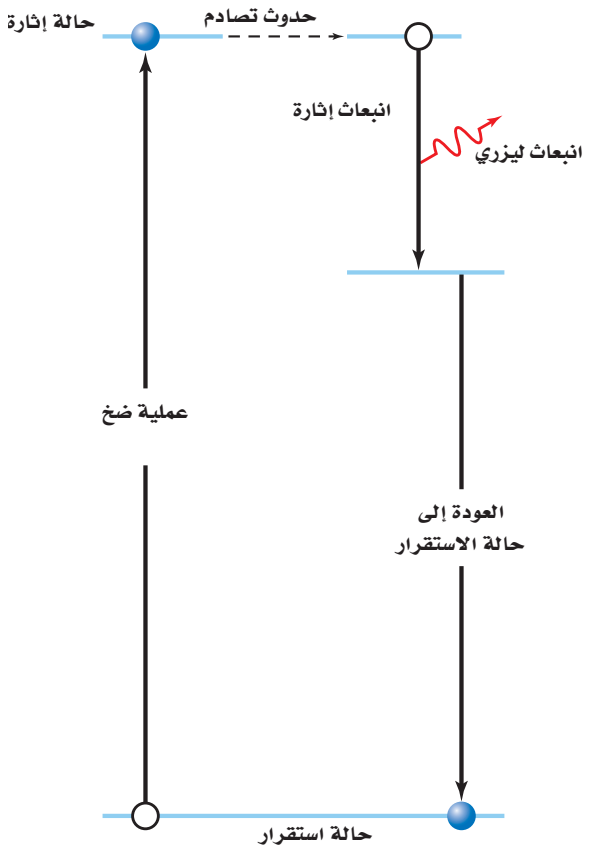


■ **الشكل 16–2** خلال الانبعاث التلقائي، ينتقل إلكترون من حالة الإثارة E_f إلى حالة الاستقرار E_i. فينبعث تلقائيًا فوتون طاقته hf (a). وخلال الانبعاث المستثار يصطدم فوتون ساقط طاقته $|E_f - E_i|$ بذرة فتنتقل إلى حالة مستقرة، وتبعث فوتونًا ويغادر كل من الفوتون الساقط والفوتون المنبعث ويكون لهما الطاقة والطور نفسيهما (b).

ولكي يحدث الانبعاث المستثار فإنه ينبغي أن تتحقق الشروط التالية: أولاً: يجب أن تكون هناك ذرات أخرى مثارة. ثانيًا: يجب أن تبقى الذرات مثارة لفترة زمنية كافية حتى يحدث التصادم. ثالثًا: يجب السيطرة على الفوتونات وتوجيهها لتكون قادرة على إحداث تصادم مع الذرات المثارة.

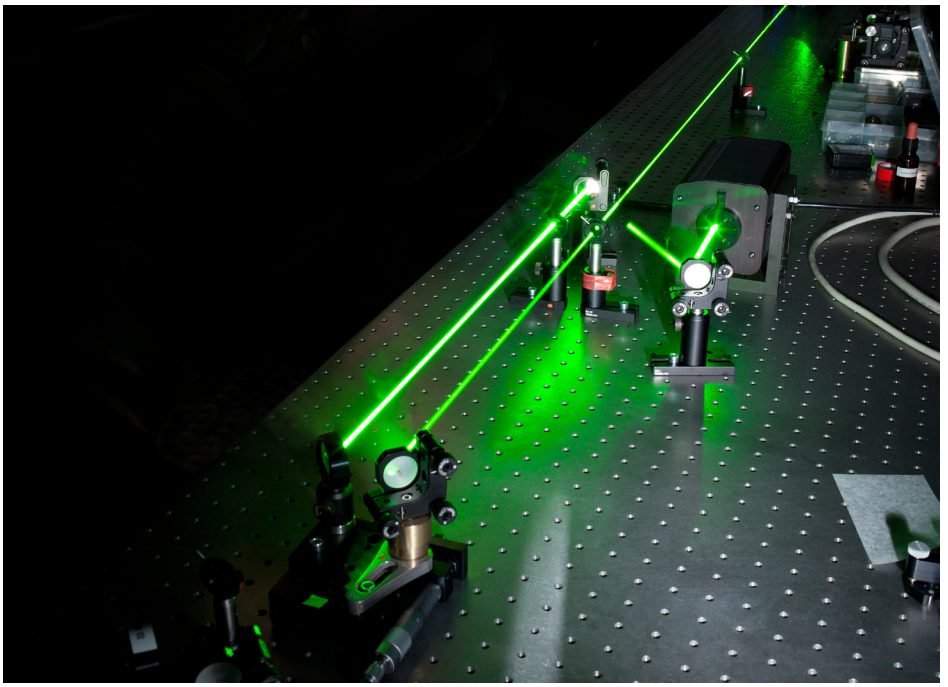
في عام 1959م، تم ابتكار أداة تسمى **ليزر**، وقد حققت جميع الشروط اللازمة لإنتاج ضوء مترابط. وكلمة ليزر هي اختصار للعبارة "تضخيم الضوء بوساطة الانبعاث المستثار للإشعاع". والذرة التي تبعث الضوء عندما تكون مثارة في الليزر تسمى ذرة ليزرية.

إثارة الذرة الذرات في الليزر يمكن أن تثار أو تضخ كما هو موضح في **الشكل 17–2**. حيث يمكن لومضة كثيفة من الضوء، ذات طول موجي أقصر من الليزر أن تستخدم لضخ الذرات. وتُنتج الفوتونات ذات الطول الموجي الأقصر، والطاقة الأكبر بوساطة الومضة التي تصطدم بذرات الليزر، لتصبح مثارة. وعندما تنتقل إحدى الذرات المثارة إلى مستوى الطاقة الأدنى بانبعاث فوتون يبدأ انبعاث سيل من الفوتونات. وهذه نتيجة عملية لانبعاث ومضة صغيرة أو نبضة من ضوء الليزر. كما يمكن للذرات الليزرية أن تثار نتيجة التصادم مع ذرات أخرى. ففي أجهزة ليزر هيليوم- نيون التي نشاهدها غالبًا في مختبرات العلوم، فإن التفريغ الكهربائي هو الذي يثير ذرات الهيليوم، حيث تصطدم ذرات الهيليوم المثارة مع ذرات النيون لتصبح مثارة، وتتحول إلى ذرات ليزرية. وضوء الليزر الناتج عن هذه العملية يكون مستمرًّا، وليس على شكل نبضات.



الشكل 17–2 عندما يصطدم فوتون، مع ذرة مثارة، فإنه يحفز الذرة لتبعث فوتونًا مترابطًا ثانيًا، لتعود الذرة إلى حالتها الأولى.

إنتاج الليزر الفوتونات المنبعثة من الذرات الليزرية تبقى محتواة عن طريق حصر تلك الذرات في أنبوب زجاجي على طرفيه المتقابلين مرايا مستوية متوازية، وسطوحها العاكسة متقابلة. إحدى هذه المرايا عاكسة بمقدار يزيد على 99.9%، وتعكس كل الضوء الساقط عليها تقريبًا، بينما المرآة الأخرى عاكسة جزئيًّا، وتسمح لـ 1% من الضوء الساقط عليها بالمرور من خلالها. حيث تنعكس الفوتونات التي تنبعث في اتجاه نهايتي الأنبوب مرتدة إلى الغاز بوساطة المرايا، وتصطدم الفوتونات المنعكسة بذرات أكثر، محرِّرة فوتونات أكثر عند كل عبور بين المرايا. وباستمرار العملية تتكوّن كثافة أكبر من الفوتونات، ثم تخرج الفوتونات من الأنبوب خلال مرآة جزئية الانعكاس، منتجة شعاع ليزر. **الشكل 18–2** يوضح الليزر المستخدم في المختبر.



الشكل 18–2 ينتج مصدر الأرجون هذا شعاعًا من ضوء مترابط.

ولأن جميع فوتونات الإثارة، تنبعث في الطور نفسه مع الفوتونات التي تصطدم بالذرات، فإن ضوء الليزر يكون مترابطًا. وكذلك فإن ضوء الليزر له الطول الموجي نفسه (أحادي اللون) بسبب انتقال الإلكترونات بين زوج واحد فقط من مستويات الطاقة، وفي نوع واحد من الذرات. المرايا المتوازية المستخدمة في الليزر والتي ينتج عنها انبعاث ضوء الليزر، تكون موجهة بدقة عالية جدًّا. ومن جهة أخرى، فإن ضوء الليزر لا ينحرف مهما ابتعد عن مصدره. ولأن شعاع الليزر التقليدي صغير جدًّا، لا يتجاوز قطر شعاعه 2 mm، فإن الضوء يكون عالي الكثافة. ويمكن تصنيع بعض المواد الصلبة والسائلة والغازية لتصبح ليزرية، من ناحية أخرى، فإن معظم المواد تنتج ضوء ليزر بطول موجي واحد. ويمكن إعادة ضبط الضوء الصادر من بعض مصادر الليزر على مدى معين من الأطوال الموجية.

تطبيقات الليزر Laser Applications

عندما تشغل جهاز تشغيل القرص المدمج CD أو DVD، فإنك بذلك تستخدم الليزر. وأجهزة الليزر هذه، تشبه تلك المستخدمة في مؤشرات الليزر، وهي مصنوعة من مواد صلبة شبه موصلة. فمصدر الليزر في مشغل القرص المدمج مصنوع من طبقات من زرنيخات الجاليوم (GaAs)، ومن الزرنيخ والجاليوم والألومونيوم (GaAlAs)، ويبلغ سمك الطبقة الليزرية 200 nm فقط، وطول كل جانب من البلورة (1-2 mm) فقط. وتضخ ذرات المادة شبه الموصلة الصلبة بوساطة تيار كهربائي، وتضخم الفوتونات الناتجة كلما ارتدت بين نهايات البلورة المصقولة. يوضح **الجدول 1–2** بعض مصادر الليزر الشائعة والطول الموجي، ونوع الليزرلكل منها.

تطبيق الفيزياء

جراحة العين بالليزر

يستخدم الليزر المثار في جراحة العين، لأن طاقة الفوتونات التي تبعثها قادرة على تدمير النسيج غير الطبيعي دون إحداث أذى بالأنسجة السليمة المحيطة.

لذلك، فإن الجرّاح الماهر يستطيع باستخدام الليزر، إزالة طبقات رقيقة جدًا من الأنسجة لإعادة شكل الشبكية.

الجدول 1–2

مصادر الليزر الشائعة

المصدر	الطول الموجي (nm)	النوع
غاز فلوريد الكربتون (krF)	248 (فوق بنفسجي)	نبض
غاز نيتروجين (N_2)	337 (فوق بنفسجي)	نبض
بلورة نيتريد الجاليوم والإنديوم (InGaN)	420	مستمر
أيون الأرجون (Ar^+)	476.5، 488.0، 514.5	مستمر
غاز النيون (Ne)	632.8	مستمر
بلورة الزرنيخ والجاليوم والألومنيوم (GaAlAs)	635، 680	مستمر
بلورة زرنيخات الجاليوم (GaAs)	840–1350 (تحت حمراء)	مستمر
بلورة النيوديميوم (Nd)	1064 (تحت حمراء)	نبض
غاز ثاني أكسيد الكربون (CO_2)	10600 (تحت حمراء)	مستمر

على الرغم من قلة فاعلية معظم مواد الليزر إلا أن خصائصه المميزة كعدم تشتته عند قطع المسافات الطويلة، وكون حزمة الليزر ضيقة وموجهة بدقة كبيرة جعلته يدخل في بعض التطبيقات كاختبار استقامة الأنفاق والأنابيب.

عندما هبط رواد الفضاء على سطح القمر، قاموا بتثبيت مرايا على سطحه، وهذه المرايا استخدمت لتعكس حزم الليزر التي ترسل من الأرض، وبذلك أمكن حساب المسافة بين القمر والأرض بدقة عالية، وكذلك تتبع مواقع القمر من مناطق مختلفة على الأرض، وقياس حركة الصفائح التكتونية الأرضية.

يستخدم ضوء الليزر بصورة شائعة في اتصالات الألياف البصرية؛ حيث يعمل سلك الليف البصري على الانعكاسات الداخلية الكلية، لنقل الضوء لمسافات طويلة بخسارة بسيطة لطاقة الإشارة. وقد حلت الألياف البصرية على مستوى العالم محل الأسلاك النحاسية لنقل المكالمات التليفونية، وبيانات الحاسوب، أو حتى الصور التليفزيونية.

الشكل 19–2 فوتونات الأشعة فوق البنفسجية المنبعثة من جهاز الليزر هذا قادرة على نزع إلكترونات من ذرات أنسجة الهدف. فتحطم الفوتونات الروابط الكيميائية وتبخر الأنسجة.

وكذلك، فإن الطول الموجي الأحادي للضوء الصادر عن أجهزة الليزر، يجعلها تستخدم في أجهزة المطياف لتحليل عينة ما. حيث يستخدم ضوء الليزر لإثارة ذرات أخرى، ثم تعود الذرات بعد ذلك إلى حالة الاستقرار، وتبعث طيفًا مميّزًا يمكن من خلاله التعرف على العينة ومكوناتها.

■ **الشكل 20–2** يتشكل الهولوجرام عندما يسجّل نمط التداخل بين الموجة المرجعية والموجة المنعكسة عن الجسم.

تستخدم الطاقة المركّزة لضوء الليزر بطرائق متعددة وفي مجالات مختلفة. ففي الطب مثلاً يستخدم الليزر في إعادة تحدب قرنية العين إلى وضعها الطبيعي. ويمكن إستخدامه في الجراحة بدون دم أيضًا، كما هو موضح في **الشكل 19–2**. ويستخدم الليزر في الصناعة أيضًا لقطع المعادن مثل الفولاذ وتلحيم المواد معًا. ومن المحتمل في المستقبل أن يستخدم الليزر لإنتاج اندماج نووي لإيجاد مصدر للطاقة لا ينضب تقريبًا.

جهاز الهولوجرام الموضح في **الشكل 20–2**، عبارة عن مسجّل فوتوجرافي لكل من شدة وطور الضوء. وقد أصبح إنتاج أجهزة الهولوجرام ممكنًا بفضل الطبيعة المترابطة لضوء الليزر. وباستطاعة أجهزة الهولوجرام هذه تكوين صور ثلاثية الأبعاد. وهناك تطبيقات أخرى تستخدم في صناعة أجهزة أشباه الموصلات مثل الدوائر المتكاملة، كما تستخدم لدراسة اهتزازات المعدات الحساسة.

2–2 مراجعة

11. **أجهزة الليزر** أي أجهزة الليزر في الجدول 1-2 تبعث ضوءًا أكثر احمرارًا (ضوءًا مرئيًّا ذا طول موجي كبير). وأيها يبعث ضوءًا أزرق؟ وأيها يبعث حزمًا ضوئية لا يمكن رؤيتها بالعين؟
12. **ضخ الذرات** وضح ما إذا كان يمكن استخدام الضوء الأخضر لضخ ضوء ليزر أحمر. لماذا لا يستخدم الضوء الأحمر لضخ الضوء الأخضر؟
13. **محددات نموذج بور** ما أوجه القصور في نموذج بور، على الرغم من توقعه سلوك ذرة الهيدروجين بدقة؟
14. **النموذج الكمي** وضح لماذا تعارض نموذج بور للذرة مع مبدأ عدم التحديد، بينما لم يتعارض النموذج الكمي معه؟
15. **أجهزة الليزر** وضّح كيف يعمل ليزر الانبعاث المستثار على إنتاج ضوء مترابط؟
16. **ضوء الليزر** ما الخصائص الأربعة لضوء الليزر التي تجعله مفيدًا؟
17. **التفكير الناقد** افترض أنه تم الحصول على سحابة صغيرة جدًّا من الإلكترونات، بحيث تكون الذرة بحجم النواة تقريبًا. استخدم مبدأ عدم التحديد؛ لتوضيح لماذا تستهلك كمية هائلة من الطاقة في هذه الحالة؟

ليزر الذرة Atom Laser

التطور الحديث تقنية الليزر الذري التي طُوّرت مؤخرًا لها مستقبل واعد. فبخلاف أجهزة الليزر التقليدية التي تصدر حزمًا أو نبضات من الفوتونات المترابطة، فإن الليزرات الذرية تصدر حزمًا أو نبضات من الذرات المترابطة. وكما سيتضح لاحقًا، فإن الذرات المترابطة تختلف عن الذرات غير المترابطة التي تكوّن المادة الطبيعية.

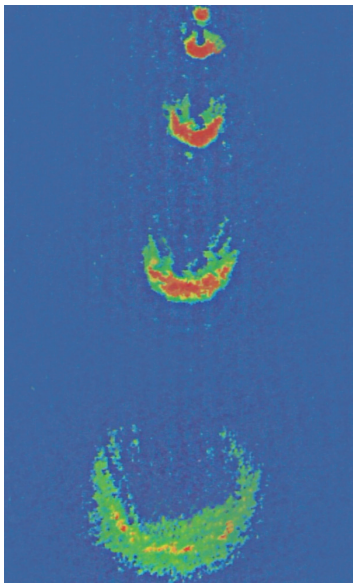
تاريخ توقع العالم برولي عام 1923م أن لجميع الجسيمات خصائص موجية، وطولها الموجي يتناسب عكسيًّا مع كتلة وسرعة الجسيم، وهو قصير جدًّا بحيث يصعب ملاحظته عند درجة حرارة الغرفة، لكن عند تبريد الذرة تقل سرعتها ويزداد طولها الموجي.

بحث العالمان أينشتاين وبوز في عام 1920م في جسيمات تسمى بوزونات. وقد توقعا أنه إذا كان بالإمكان تبريد البوزونات إلى أدنى مستوى طاقة ممكن، فإن كل تلك الجسيمات سيكون لها الطور والطول الموجي نفساهما. أي أن هذه الجسيمات سيكون لها خصائص مترابطة. والطور غير الطبيعي هذا يسمى تكاثف بوز-أينشتاين.

إن أول تكاثفات بوز- أينشتاين أُنتجت عام 1995م، حيث قام بإنتاجها العالمان إيرك كورنل، وكارل ويمان، وقام بإنتاجها كذلك بشكل منفصل العالم فولجانج كيترل، الذي قام بإجراء بحث آخر، حيث وضع عينتين منفصلتين لتكاثف بوز-أينشتاين إحداهما بجانب الأخرى، ولاحظ أنماط التداخل من الذرات في هذه التكاثفات. فذهب إلى تأكيد أن جميع الذرات في حالة التكاثف لها الطول الموجي والطور نفساهما. وكانت الذرات في التكاثف مترابطة تمامًا كما توقع ذلك كل من بوز وأينشتاين.

الليزر الذري الأول أعلن العالم كيترل ومساعدوه عام 1997م الخطوات الأولى في تطوير الليزر الذري؛ فقد طوّروا طريقة لقذف نبضات صغيرة (بين 100,000 و 1000,000 ذرة) من ذرات مترابطة من تكاثف بوز- أينشتاين في حزمة.

في هذا الليزر الذري الأول، يمكن لنبضات الذرات المترابطة الانتقال في اتجاه واحد فقط، بينما تسلك الذرات المنبعثة سلوك الجسيمات تمامًا، بحيث تتبع المسار القوسي إلى أسفل؛ نتيجة تأثير الجاذبية. وكما هو موضح في الصورة فإن الذرات المترابطة في كل نبضة تميل إلى الانتشار بعيدًا عندما تنتشر الحزمة.



يبعث الليزر الذري نبضات من ذرات الصوديوم المترابطة. تحتوي كل نبضة على 10^5 إلى 10^6 من الذرات، وتتسارع النبضات إلى أسفل نتيجة تأثير الجاذبية. وتنتشر النبضات بسبب تأثير قوى التنافر

وفي عام 1999م وجد وليم فيلبس طريقةً لإرسال نبضات من الذرات المترابطة في أي اتجاه، وكيفية منع الذرات من الانتشار بعيدًا عندما تنتشر الحزمة. وبتكوين سلسلة من الحزم القصيرة جدًّا، استطاع فيلبس تكوين حزمة مستمرة من الذرات المترابطة.

المستقبل سيتم استخدام تكاثف بوز- أينشتاين، والليزرات الذرية في دراسة الخصائص الأساسية لميكانيكا الكم والموجات المادية. ويتوقع العلماء أن تكون الليزرات الذرية مفيدة في صناعة الساعات الذرية العالية الدقة، وفي صناعة دوائر إلكترونية صغيرة. ويمكن أن تستخدم الليزرات الذرية أيضًا في علم القياس بالتداخل الضوئي الذري لقياس قوى التجاذب بدقة عالية، ولاختبار النسبية.

التوسع

1. **بحث** ابحث في ماهية الفيرميونات. وهل باستطاعتها تكوين تكاثف بوز- أينشتاين.
(توضيح: انظر كيف يطبق مبدأ باول في الاستبعاد على الفيرميونات).
2. **التفكير الناقد** تعمل الليزرات الذرية في منطقة تفريغ عالية جدًّا. ترى، ما سبب صحة ذلك؟

الفصل 2

دليل الدراسة

2–1 نموذج بور الذري The Bohr Model of the Atom

المفردات

- جسيمات ألفا
- نيوكليونات
- طيف الامتصاص
- مستوى الطاقة
- حالة الاستقرار
- حالة الإثارة
- عدد الكم الرئيس

الفكرة الرئيسة: **يمثل نموذج بور للذرة الذرة كنواة مركزية وإلكترونات تدور حول النواة ولها طاقات كمية محددة.**

- استنتج رذرفورد أن معظم حجم الذرة فراغ، كذلك توقع وجود نواة ثقيلة وصغيرة جدًّا، وذات شحنة موجبة في مركز الذرة.
- يمكن استخدام الطيف الناتج عن ذرات العنصر لتحديد عينة مجهولة من ذلك العنصر.
- إذا عبر ضوء أبيض خلال غاز فإن الغاز يمتص الأطوال الموجية نفسها التي سوف يبعثها عندما يثار. وإذا عبر الضوء بعد ذلك خلال منشور فإن طيف الامتصاص للغاز يكون مرئيًّا.
- أظهر نموذج نيلز بور للذرة أن طاقة الذرة لها قيم محددة فقط، لذلك فإنها مكمّاة. وأن طاقة ذرة الهيدروجين في مستوى طاقة n تساوي:

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2}\ \text{eV}$$

- ينتقل الإلكترون بين مستويات الطاقة المسموح بها، وهذه الطاقة تمتص أو تبعث على شكل فوتونات (موجات كهرومغناطيسية). طاقة الفوتون تساوي الفرق بين الحالتين الابتدائية والنهائية للذرة.

$$E_{\text{فوتون}} = |E_f - E_i|$$

- نصف قطر مدار الإلكترون في مستوى الطاقة n لذرة الهيدروجين يعطى بالمعادلة:

$$r_n = 5.3 \times 10^{-11} n^2\ \text{m}$$

2–2 نموذج الذرة الكمي The Quantum Model of the Atom

المفردات

- النموذج الكمي
- السحابة الإلكترونية
- ميكانيكا الكم
- الضوء المترابط
- الضوء غير المترابط
- الانبعاث المستثار
- الليزر

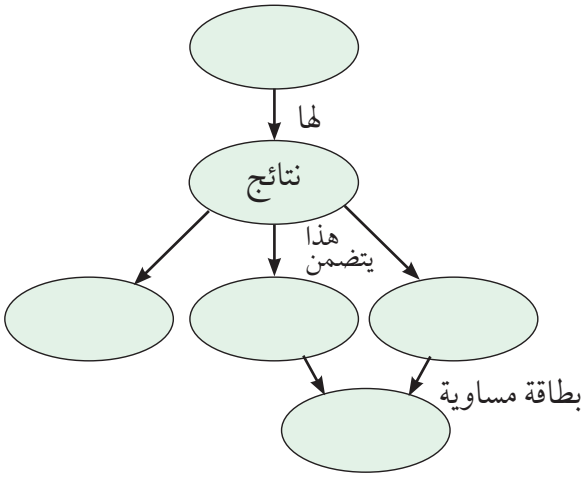
الفكرة الرئيسة: **يتنبأ النموذج الكمي للذرة باحتمالية العثور على إلكترون في منطقة معينة.**

- في النموذج الكمي- الميكانيكي للذرة، تملك الذرة قيمًا محددة للطاقة، وهذه القيم مكماة.
- في النموذج الكمي- الميكانيكي للذرة، يمكن تحديد احتمالية إيجاد الإلكترون في منطقة محددة فقط في ذرة الهيدروجين، فالمسافة الأكثر احتمالية للإلكترون عن النواة تساوي نصف قطر مستوى الإلكترون في نموذج بور.
- نجحت ميكانيكا الكم إلى حدٍّ كبير في تحديد خصائص الذرات والجزيئات والمواد الصلبة.
- تنتج أجهزة الليزر ضوءًا أحادي اللون، ومترابطًا، وموجهًا، وذا طاقة عالية. وكل خاصية تمنح الليزر تطبيقات مفيدة.

الفصل 2
التقويم

خريطة المفاهيم

18. أكمل خريطة المفاهيم التالية مستخدمًا ما يلي: مستويات الطاقة، أقطار مستويات الإلكترون الثابتة، نموذج بور، انبعاث وامتصاص الفوتون، فرق مستوى الطاقة.



إتقان المفاهيم

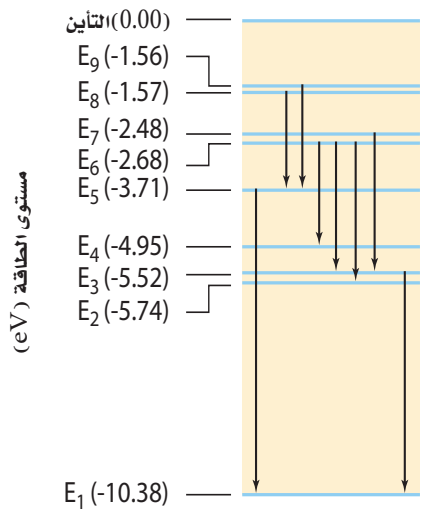
19. وضح كيف حدد رذرفورد أن الشحنة الموجبة في الذرة متمركزة في منطقة صغيرة جدًّا، وليست منتشرة في الذرة.
20. كيف فسر نموذج بور تضمين طيف الامتصاص للهيدروجين ترددات طيف الانبعاث نفسها للهيدروجين؟
21. قم بمراجعة نموذج رذرفورد للذرة. ما المشكلات المتعلقة بهذا النموذج؟
22. حلل وانتقد نموذج بور للذرة. ما الافتراضات الثلاثة التي قدمها بور لتطوير نموذجه؟
23. **أنابيب الغاز المفرغة** وضح كيف تنتج الأطياف الخطية في أنابيب الغاز المفرغة؟
24. كيف قدّم نموذج بور تفسيرًا للطيف المنبعث من الذرات؟
25. فسّر لماذا تختلف الأطياف الخطية الناتجة عن أنابيب التفريغ لغاز الهيدروجين عن تلك الأطياف الناتجة عن أنابيب التفريغ لغاز الهيليوم.
26. **الليزرات** إن مصدر الطاقة لجهاز الليزر المختبري 8×10^{-4} W فقط لماذا يبدو أنه أكثر قدرة من ضوء مصباح كهربائي 100 W؟
27. ما خصائص ضوء الليزر التي أدت إلى استخدامه في العروض الضوئية؟

تطبيق المفاهيم

28. يختلف مستوى التعقيد لمستويات الطاقة من ذرة إلى أخرى. كيف تتوقع أن يؤثر ذلك في الأطياف التي تنتجها؟
29. **الأضواء الشمالية** تحدث الأضواء الشمالية بوساطة جسيمات ذات طاقة عالية قادمة من الشمس عندما تصطدم بذرات في الغلاف الغازي للأرض، إذا نظرت إلى هذه الأضواء خلال منظار طيفي فهل تشاهد طيفًا متصلاً، أم طيفًا خطيًّا؟ فسّر.
30. إذا انبعث ضوء أبيض من سطح الأرض، وشاهده شخص من الفضاء، فهل يظهر الطيف بحيث يكون متصلاً؟ فسّر.
31. هل تعدّ قطع النقود مثالاً جيدًا للتكمية؟ هل يعدّ الماء في الكوكب الأرضي كذلك؟ فسّر.
32. ذرة لها أربعة مستويات للطاقة، E_4 مستوى الطاقة الأعلى، و E_1 مستوى الطاقة الأدنى. إذا حدثت انتقالات بين أي مستويين للطاقة، فما عدد الخطوط الطيفية التي تستطيع الذرة أن تبعث بها؟ ما الانتقال الذي يبعث فوتونًا بأعلى طاقة؟

33. يبين **الشكل 21–2**، دخول فوتون طاقته 6.2 eV ذرة زئبق في حالة استقرار. هل تمتصه الذرة ؟ فسّر.

شكل مستوى الطاقة لذرة الزئبق



الشكل 21–2

34. ينبعث فوتون عندما ينتقل إلكترون ذرة الهيدروجين المثارة خلال مستويات الطاقة. ما مقدار الطاقة العظمى التي يمكن أن تكون للفوتون؟ إذا مُنحت كمية الطاقة هذه إلى ذرة في حالة الاستقرار، فما الذي يحدث؟

35. قارن بين نظرية الكم الميكانيكية للذرة ونموذج بور.

36. أي الليزرات الأحمر، والأخضر، والأزرق ينتج فوتونات بطاقة أكبر؟

إتقان حل المسائل

2–1 نموذج بور الذري

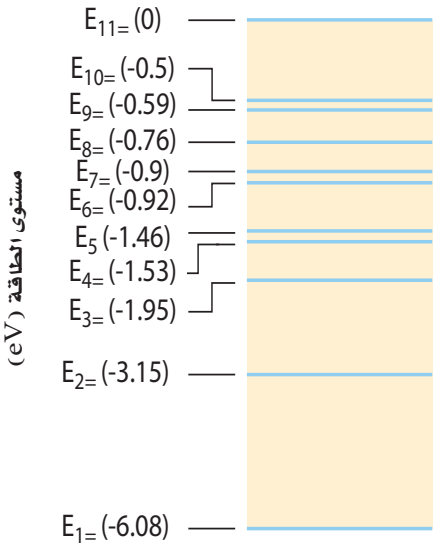
37. ينتقل إلكترون ذرة كالسيوم من مستوى الطاقة السادس، إلى مستوى الطاقة الثاني. ما الطول الموجي للفوتون المنبعث؟

38. إذا دخل فوتون ضوء برتقالي طوله الموجي 6.00×10^2 nm في ذرة كالسيوم مثارة عند مستوى الطاقة E_6 فتأينت الذرة، فما مقدار طاقة حركة الإلكترون المنبعث من الذرة؟

39. ذرة كالسيوم مثارة إلى مستوى طاقة E_2. اصطدم بها فوتون طاقته 1.20 eV، فامتصته. إلى أي مستوى طاقة تنتقل ذرة الكالسيوم؟ انظر إلى **الشكل 22–2**.

40. ذرة كالسيوم مثارة عند مستوى طاقة E_6. ما مقدار الطاقة المتحررة عندما تهبط الذرة إلى مستوى الطاقة E_2؟ ارجع إلى **الشكل 22–2**.

شكل مستوى الطاقة لذرة الكالسيوم



الشكل 22–2

41. احسب الطاقة المرتبطة بمستويات الطاقة E_7 و E_2 لذرة الهيدروجين.

42. احسب الفرق في مستويات الطاقة في المسألة السابقة.

ارجع إلى **الشكل 21–2** لحل المسألة 43.

43. ذرة زئبق مثارة عند مستوى طاقة E_6، ما مقدار الطاقة:

a. اللازمة لتأيين الذرة؟

b. المتحررة عندما تهبط الذرة إلى مستوى الطاقة E_2؟

44. ذرة هيدروجين مثارة إلى $n = 3$. وفق نموذج بور، أوجد كلًّا مما يلي:

a. نصف قطر المستوى.

b. القوة الكهربائية بين البروتون والإلكترون.

c. التسارع المركزي للإلكترون.

d. سرعة الإلكترون في مداره (قارن بين هذه السرعة وسرعة الضوء).

2–2 نموذج الذرة الكمي

45. **مشغل القرص المدمج CD** تستخدم ليزرات زرنيخات الجاليوم بصورة شائعة في مشغلات القرص المدمج. إذا بعث مثل هذا الليزر عند طول موجي 840 nm، فما مقدار الفرق بوحدة eV بين مستويات الطاقة ؟

46. أُدخل ليزر GaInNi بين مستويات طاقة مفصولة بطاقة مقدارها 2.90 eV، أجب عما يأتي:

a. ما الطول الموجي للضوء المنبعث من الليزر؟

b. في أي جزء من الطيف يقع هذا الضوء؟

47. ينبعث ليزر ثاني أكسيد الكربون بفوتون أشعة تحت حمراء طاقته عالية جدًّا. ما مقدار فرق الطاقة بوحدة eV بين مستويات الطاقة الليزرية؟ ارجع إلى **الجدول 1–2**.

48. **ليزرات HeNe** يمكن صنع الليزرات HeNe المستخدمة بوصفها مؤشرات يستخدمها المحاضرون، بحيث تنتج ليزرًا عند الأطوال الموجية الثلاثة: 1152.3 nm، 543.4 nm، 632.8 nm.

a. أوجد فرق الطاقة بين كل وضعين متضمنين في حزمة كل طول موجي.

b. حدد لون كل طول موجي.

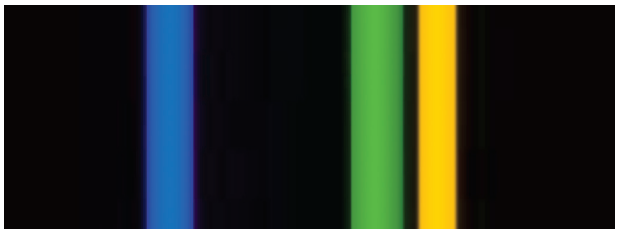
مراجعة عامة

49. يدخل فوتون طاقته 14.0 eV ذرة هيدروجين في حالة الاستقرار فيؤينها. ما مقدار الطاقة الحركية للإلكترون المتحرر من الذرة؟

50. احسب نصف قطر المستوى لكل من مستويي الطاقة E_5 و E_6 لذرة الهيدروجين.

التفكير الناقد

51. **تطبيق المفاهيم** يوضح **الشكل 23–2** نتيجة إسقاط طيف مصباح غاز الزئبق ذي الضغط العالي على حائط في غرفة مظلمة. ما فروق الطاقة لكل من الخطوط المرئية الثلاثة؟



الشكل 23–2

52. **تفسير الرسوم التوضيحية** بعد انبعاث الفوتونات المرئية التي تم وصفها في المسألة 51، تستمر ذرة الزئبق في بعث فوتونات حتى تصل إلى حالة الاستقرار. من خلال اختبار **الشكل 21–2** حدد ما إذا كانت هذه الفوتونات مرئية أم لا. فسر ذلك.

الكتابة في الفيزياء

53. اكتب بحثًا عن تاريخ تطور نماذج الذرة. واصفًا كل نموذج باختصار، ومحددًا أوجه القوة والضعف لكل نموذج.

54. يبعث مؤشر ليزر أخضر ضوءًا طوله الموجي 532 nm اكتب بحثًا في نوع الليزر الذي يستخدم في هذا النوع من المؤشرات، وصف طريقة عمله. وحدّد ما إذا كان الليزر على شكل نبضات أم مستمر.

مراجعة تراكمية

55. جهد الإيقاف اللازم لاستعادة جميع الإلكترونات المنبعثة من فلز 7.5 V، ما مقدار الطاقة الحركية القصوى للإلكترونات بوحدة الجول؟

تقويم الفصل 2

أسئلة اختيار من متعدد

اختر رمز الإجابة الصحيحة فيما يلي:

1. أي نماذج الذرة الآتية تعتمد على تجربة صفيحة الذهب الرقيقة لرذرفورد؟

Ⓐ نموذج بور Ⓑ النموذج النووي

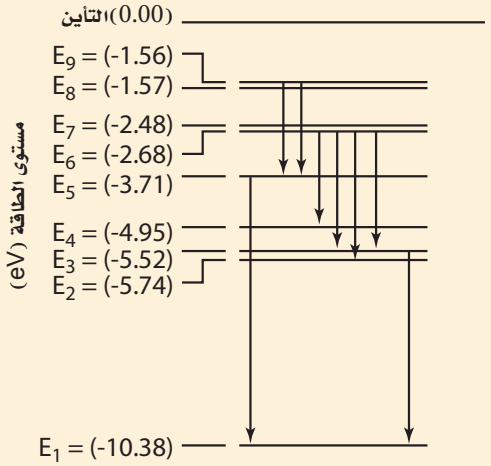
Ⓒ نموذج تومسون Ⓓ النموذج الكمي

2. تبعث ذرة زئبق ضوءًا طول موجته 405 nm، ما مقدار فرق الطاقة بين مستويي الطاقة في هذا الانبعاث؟

Ⓐ 0.22 eV Ⓒ 3.06 eV

Ⓑ 2.14 eV Ⓓ 4.05 eV

3. يبيّن الرسم أدناه مستويات الطاقة لذرة الزئبق. ما طول موجة الضوء المنبعث عندما تحدث تحولات في الذرة من مستوى الطاقة E_7 إلى المستوى E_4؟



Ⓐ 167 nm Ⓒ 400 nm

Ⓑ 251 nm Ⓓ 502 nm

4. أي الجمل الآتية يعدها النموذج الكمي للذرة غير صحيحة؟

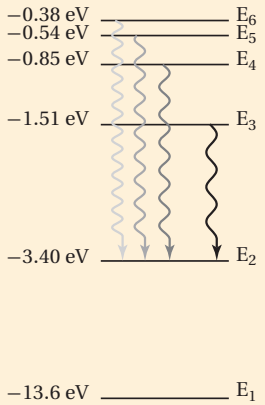
Ⓐ مستويات الطاقة المسموح بها للذرة مكماة.

Ⓑ مواقع الإلكترونات حول النواة معروفة بدقة.

Ⓒ تحدد سحابة الإلكترون المساحة التي يحتمل أن تواجد الإلكترون فيها.

Ⓓ ترتبط مستويات الإلكترون المستقرة مع طول موجة دي برولي.

لحل المسألتين 5 و 6 ارجع إلى الرسم التوضيحي الذي يبين سلسلة بالمر لانتقال الإلكترون في ذرة الهيدروجين.



5. أي إنتقال مسؤول عن انبعاث ضوء بأكبر تردد؟

Ⓐ E_2 إلى E_5 Ⓒ E_3 إلى E_6

Ⓑ E_3 إلى E_2 Ⓓ E_6 إلى E_2

6. ما مقدار تردد خط سلسلة بالمر المرتبط بالإنتقال من مستوى الطاقة E_4 إلى E_2؟ (لاحظ أن $1\ eV = 1.6 \times 10^{-19}\ J$)

Ⓐ 2.55×10^{14} Hz Ⓒ 6.15×10^{14} Hz

Ⓑ 4.32×10^{14} Hz Ⓓ 1.08×10^{15} Hz

الأسئلة الممتدة

7. حدد الطول الموجي للضوء المنبعث، نتيجة إنتقال إلكترون ذرة الهيدروجين من مستوى طاقة $n = 5$ إلى مستوى طاقة $n = 2$؟

✓ إرشاد

التعثر ليس كالسقوط

أحيانًا قد تواجه سؤالاً ليس لديك فكرة عن إجابته، وحتى بعد أن تقرأ السؤال عدة مرات قد لا تتكون عندك فكرة منطقية عن الإجابة. إذا كان السؤال من نوع الاختيار من متعدد، فركِّز على جزء من السؤال تعرف شيئًا عنه، واستثنِ أكبر عدد ممكن من الخيارات، واختر أحد الخيارات المتبقية، وانتقل إلى سؤال آخر.

الفصل 3

الفيزياء النووية
Nuclear Physics

يتوقع بعد الإنتهاء من دراسة هذا الفصل أن أكون قادرًا على:

- توضيح المفاهيم المرتبطة بالنواة (العدد الذري، وحدة الكتلة الذرية، العدد الكتلي، النويدة (نواة النظير)، القوة النووية القوية، النيوكليونات، طاقة الربط النووية، نقص الكتلة).
- تحديد عدد النيوترونات والبروتونات في النواة.
- الربط بين الطاقة الناتجة عن التفاعل النووي والتغيّر في طاقة الربط النووية في أثناء التفاعل.
- توضيح المفاهيم المرتبطة بالاضمحلال النووي والتفاعلات النووية (المواد المشعة، انبعاث ألفا، انبعاث بيتا، انبعاث جاما، عمر النصف، التفاعل النووي، الانشطار النووي، التفاعل المتسلسل، الاندماج النووي).
- وصف أنماط الانبعاث الإشعاعي الثلاث.
- حلّ معادلات نووية.
- حساب كمية المادة المشعة المتبقية، ونشاطيتها بعد فترة زمنية محددة.
- وصف عمل المفاعل النووي.
- توضيح المفاهيم المرتبطة بوحدات بناء المادة (الكواركات، اللبتونات، النموذج المعياري، حاملات القوة، إنتاج الزوج، القوة النووية الضعيفة).
- وصف عمل مسارعات الجسيمات، وكواشف الجسيمات.
- وصف النموذج المعياري للمادة، ودور حاملات القوة.
- حساب الطاقة المتحررة من التفاعلات النووية والمقارنة بين طاقة الانشطار النووي وطاقة الاندماج النووي.
- استخدام الأدوات والأجهزة المتعلقة بفيزياء النواة لإجراء التجارب وبناء نماذج وتمثيل البيانات وتحليلها.
- إدراك أهمية فيزياء النواة في الحياة اليومية.

الفكرة العامة

انقسام واندماج الأنوية الذرية يؤدي إلى انطلاق الطاقة.

3-1 النواة

الفكرة الرئيسة طاقة الربط النووية تمثل النقص في كتلة النواة.

3-2 الاضمحلال النووي والتفاعلات النووية

الفكرة الرئيسة الاضمحلال الإشعاعي يؤدي إلى انبعاث جسيمات ذرية وطاقة، ويمكن أن تنتج عناصر جديدة.

3-3 وحدات بناء المادة

الفكرة الرئيسة تتكون المادة من الكواركات واللبتونات وتتفاعل من خلال حاملات القوة.

فكِّر

كيف تساعد الأشعةُ المنبعثة من النظائر المشعة العلماءَ والأطباء على تتبع العمليات التي تجري في جسم الإنسان؟

الفيزياء عبر المواقع الإلكترونية
www.obeikaneducation.com

تجربة استهلالية

كيف يمكنك عمل نموذج للنواة؟

سؤال التجربة فيم تتشابه القوة التي يؤثر بها شريط ذو وجهين لاصقين مع القوة النووية القوية؟

الخطوات

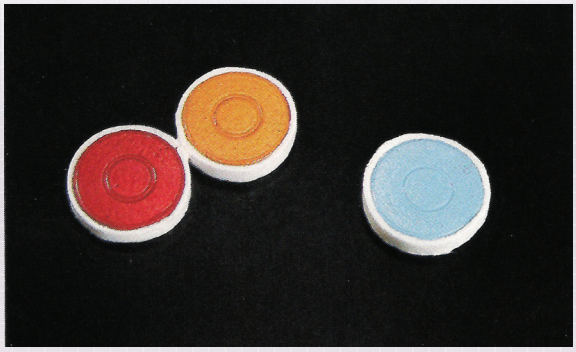
1. غلّف المحيط الخارجي لـ(3–6) أقراص مغناطيسية، باستخدام الشريط اللاصق ذي الوجهين، ثم كرر الشيء نفسه لـ(3–6) أقراص من الخشب أو الألومنيوم مماثلة لها في الحجم. تمثل المغانط البروتونات، بينما تمثل الأقراص الأخرى النيوترونات.
2. رتّب المغانط بحيث تكون أقطابها الشمالية متقابلة.
3. صف القوة المؤثرة في بروتون في أثناء تقريبه إلى بروتون آخر حتى يتلامسا.
4. صف القوة المؤثرة في نيوترون في أثناء تقريبه إلى نيوترون آخر أو من بروتون حتى يتلامسا.

التحليل

تهبط القوة النووية القوية إلى الصفر عندما يبتعد مركزا النيوكليونين أحدهما عن الآخر مسافة تزيد على نصفي قطريهما.

كيف يمكن مقارنة ذلك مع مدى قوة الشريط اللاصق؟ القوة النووية القوية متساوية لكل من النيوترونات والبروتونات. هل يصف هذا المثال ما يحدث في النواة؟

التفكير الناقد تحتوي النواة المستقرة في الغالب على عدد من النيوترونات يزيد على عدد البروتونات. لماذا يسلك هذا النموذج الطريقة نفسها التي تحدث داخل النواة؟



الفيزياء في حياتك:

تستخدم الطاقة النووية وتقنياتها في عدة مجالات بجانب توليد الكهرباء، مثل الزراعة والغذاء والطب واستكشاف الفضاء وتحلية المياه.

تساؤلات جوهرية:

- ما خصائص النواة؟
- كيف تختلف أنوية النظائر عن بعضها؟
- ما القوة التي تجعل النواة متماسكة؟
- ما طاقة الربط النووي ونقص الكتلة لنواة عنصر ما؟
- كيف يرتبط نقص الكتلة بطاقة الربط النووية؟

المفردات:

- العدد الذري
- العدد الكتلي
- القوة النووية القوية
- طاقة الربط النووي
- وحدة الكتل الذرية
- النويدة (نواة النظير)
- القوة النووية الضعيفة
- نقص الكتلة

بعد أن اكتشف العالم بيكرل عام 1896م النشاط الإشعاعي توجّه البحث إلى التأثيرات الناتجة عن اضمحلال النواة نتيجة التحلل الإشعاعي الطبيعي.

ثم اكتشف كل من ماري وبيير كوري عنصرًا جديدًا (الراديوم)، وجعلا منه عنصرًا متوافرًا للباحثين في كافة أنحاء العالم؛ مما أثرى دراسة النشاط الإشعاعي. ثم اكتشف العلماء أنه يمكن من خلال النشاط الإشعاعي تحويل نوع من الذرات إلى نوع آخر، ومن ثم، فإن الذرات لا بد أنها تتكوّن من أجزاء أصغر. ثم استخدم كل من إرنست رذرفورد، وفريدرك سودي النشاط الإشعاعي لدراسة مركز الذرة (النواة).

وصف النواة Description of the Nucleus

هل تتكوّن النواة من جسيمات مشحونة بشحنة موجبة فقط؟ تم التعرّف على كتلة النواة، وحقيقة أن شحنتها موجبة فقط، نتيجة تجارب تشتّت الأشعة السينية. وأظهرت النتائج أن البروتونات موجبة الشحنة، وأنها مسؤولة عن نصف كتلة النواة تقريبًا. وافترضت إحدى الفرضيات أن الإلكترونات مسؤولة عن كتلة الجزء الباقي من النواة، وفسرت هذه الفرضية انبعاث جسيمات الفا وجسيمات بيتا من داخل النواة، ولكن حسب نظرية الكم فإن الإلكترون لا يمكن أن يتواجد داخل النواة. وفي عام 1932 حلّ العالم الانجليزي جيمس شادويك هذه المشكلة عندما اكتشف وجود جسيم متعادل تساوي كتلته كتلة البروتون تقريبًا داخل النواة. وعُرف هذا الجسيم بالنيوترون، وهو المسؤول عن الكتلة المفقودة للنواة دون زيادة شحنتها

كتلة النواة وشحنتها البروتون هو الجسيم الوحيد المشحون داخل النواة. و**العدد الذري** Z للذرة هو عدد البروتونات. لذا فإن شحنة النواة الكلية تساوي عدد البروتونات مضروبًا في الشحنة الأساسية (شحنة الإلكترون عدديًّا).

$$\text{شحنة النواة} = Z \times e$$

ولكل من البروتون والنيوترون كتلة تزيد حوالي 1800 مرة على كتلة الإلكترون؛ وكتلة كل من البروتون أوالنيوترون تساوي تقريبًا 1u؛ حيث u **وحدة الكتلة الذرية**، وتعادل 1.66×10^{-27} kg، ولتحديد الكتلة التقريبية للنواة؛ احسب حاصل ضرب العدد الكتلي A (مجموع عدد النيوترونات والبروتونات) في وحدة الكتل الذرية u.

$$\text{كتلة النواة} \cong A \times u$$

حجم النواة أظهرت نتائج رذرفورد القياسات الأولى لحجم النواة؛ فقد وجد أن للنواة قطرًا يساوي 10^{-14} m تقريبًا. وبذلك يكون للذرة المثالية نصف قطر أكبر 10,000 مرة من حجم النواة.

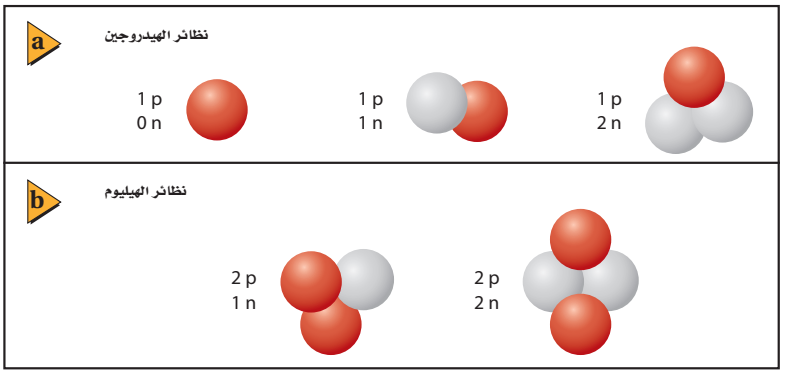
وعلى الرغم من أن النواة تحتوي على كل كتلة الذرة تقريبًا، فإن النواة تشغل حيزًا في الذرة أقل من الحيز الذي تشغله الشمس في النظام الشمسي. إن النواة مركّزة بطريقة غير مُتخيَّلة؛ فكثافتها 1.4×10^{18} kg /m^3 تقريبًا. فإذا افترضنا أن حجم النواة سنتيمتر مكعب واحد فسوف تكون كتلتها بليون طن تقريبًا.

هل لجميع العناصر العدد الكتلي نفسه؟
Do all elements have the same mass numbers?

إذا كانت النواة تتكون من البروتونات والنيوترونات فقط وكانت كتلة كل منها 1 u تقريبًا، فإن الكتلة الكلية لأي ذرة يجب أن تكون عددًا صحيحًا، وليس قريبة من العدد الصحيح.

إن اللغز المتمثل في أن الكتل الذرية التي لا تساوي عددًا صحيحًا، تم حله باستخدام جهاز مطياف الكتلة. لقد تعلمت كيف يُظهر مطياف الكتلة أنه يمكن أن يكون لذرات العنصر الواحد كتلًا مختلفة؛ ففي تحليل عينة نقية من النيون مثلاً لم تظهر بقعة واحدة فقط، بل ظهرت بقعتان على شاشة مطياف الكتلة. والبقعتان ناتجتان عن ذرتي نيون مختلفتي الكتلة. الأولى

لها كتلة 20 u، بينما كتلة النوع الثاني 22 u. إن ذرة النيون الطبيعية تحتوي على عشرة بروتونات في النواة، وعشرة الكترونات، لكن وجد أنه بينما تحتوي أنواعا من ذرات النيون على 10 نيوترونات، فإن أنواعا أخرى تحتوي نواتها على 12 نيوترونًا. هذان النوعان من الذرات يسميان نظائر النيون. وتسمى نواة النظير **النويدة**. وجميع نويدات العنصر لها العدد نفسه من البروتونات، ولكن لها أعدادًا مختلفة من النيوترونات، كما في نويدات الهيدروجين والهيليوم الموضحة في **الشكل 1–3**، علمًا بأن جميع نظائر العنصر المتعادل كهربائيًّا لها عدد الإلكترونات نفسه حول النواة، ولها السلوك الكيميائي نفسه.



الشكل 1–3 تظهر نويدات الهيدروجين (a) والهيليوم (b) لجميع نويدات العنصر العدد نفسه من البروتونات، وعدد مختلف من النيوترونات. رسمت البروتونات بلون أحمر والنيوترونات بلون رمادي في الرسم التوضيحي.

متوسط الكتلة الكتلة المقيسة لغاز النيون هي 20.183 u، وهذا الرقم يعرف بمتوسط كتلة نظائر النيون الموجودة طبيعيًّا. وعلى الرغم من أن كتلة الذرة المفردة للنيون قريبة من العدد الصحيح لوحدات الكتل، فإن الكتلة الذرية المحسوبة من متوسط الكتل للنيون ليست كذلك. ولمعظم العناصر أشكال متعددة من النظائر التي تنتج طبيعيًّا ويمكن قياس كتل هذه النظائر باستخدام جهاز مطياف الكتلة، وتستخدم كتلة أحد نظائر الكربون (كربون 12)، بوصفها وحدة الكتل الذرية؛ فوحدة الكتل الذرية الواحدة u تساوي $\frac{1}{12}$ من كتلة نظير الكربون –12

ولوصف النظير، يستخدم الرمز Z المنخفض عن يسار رمز العنصر، ليمثل العدد الذري أو الشحنة، بينما يكتب الرمز العلوي A عن يسار رمز العنصر أيضا ليمثل العدد الكتلي، بحيث يأخذ هذا الترميز الشكل $^{A}_{Z}X$؛ حيث X رمز العنصر. فيكتب الكربون 12 مثلاً $^{12}_{6}C$ ، ويكتب نظيرا النيون اللذان عددهما الذري 10 في صورة $^{20}_{10}Ne$ و $^{22}_{10}Ne$.

مسائل تدريبية

1. الأعداد الكتلية لنظائر اليورانيوم هي 234 و235 و238، والعدد الذري لليورانيوم هو 92، ما عدد نيوترونات نواة كل نظير؟
2. ما عدد نيوترونات نظير الزئبق $^{200}_{80}Hg$ ؟
3. اكتب رموز نظائر الهيدروجين الثلاثة التي تحتوي على صفر، وواحد، واثنين من النيوترونات.

ما الذي يحافظ على نيوكليونات النواة معًا؟
What holds the nucleus together?

ترتبط الإلكترونات السالبة الشحنة المحيطة بنواة الذرة الموجبة الشحنة نتيجة تأثير قوة التجاذب الكهرومغناطيسية. ولأن النواة تتكون من بروتونات موجبة الشحنة ونيوترونات متعادلة الشحنة، فقد يكون من المتوقع أن تسبب قوة التنافر الكهرومغناطيسية بين البروتونات تباعد بعضها عن بعض. ولأن هذا لا يحدث فإن قوة تجاذب متبادلة وقوية يجب أن توجد داخل النواة.

القوة النووية القوية The Strong Nuclear Force

تسمى كذلك **القوة القوية (الشديدة)**، وهي القوة التي تؤثر بين البروتونات والنيوترونات الموجودة في النواة، والقريبة جدًّا بعضها إلى بعض. وهذه القوة تزيد عن 100 مرة من قوة التنافر الكهرومغناطيسية. إن مدى القوة القوية قصير، ويساوي نصف قطر البروتون فقط، أي 1.4×10^{-15} m تقريبًا. وهي قوة تجاذب، تؤثر بين البروتونات والبروتونات، وكذلك بين البروتونات والنيوترونات، وأيضًا بين النيوترونات والنيوترونات.

تسمى كل من النيوترونات والبروتونات **النيوكليونات**، وتحافظ القوة النووية القوية على بقاء النيوكليونات في النواة. ولإخراج النيكليون خارج النواة يجب بذل شغل للتغلب على قوة التجاذب، وهذا الشغل يضاف إلى النظام. لذلك فإن طاقة النواة أقل من مجموع طاقات البروتونات والنيوترونات المنفردة التي تتكوّن منها النواة. ويتحول فرق الطاقة للنواة إلى **طاقة ربط نووية**. ولأن النواة الفعلية لها طاقة أقل، فإن طاقات الربط جميعها تكون سالبة.

طاقة الربط النووية Binding Energy of the Nucleus

بيّن أينشتاين أن كلًّا من الكتلة والطاقة متكافئتان. لذلك يمكن التعبير عن طاقة الربط على شكل كمية مكافئة من الكتلة بالمعادلة التالية:

الطاقة المكافئة للكتلة

الطاقة المحتواة في المادة تساوي حاصل ضرب الكتلة في مربع سرعة الضوء في الفراغ.

$$E = mc^2$$

حيث إن كتلة النواة الفعلية تكون أقل من مجموع كتل النيوكليونات التي تحويها؛ لذا يجب أن تضاف طاقة لفصل مكونات النواة.

فمثلاً تحوي نواة الهيليوم $^{4}_{2}He$ بروتونين ونيوترونين. وكتلة البروتون 1.007276 u، وكتلة النيوترون 1.008665 u، فإذا كانت كتلة نواة الهيليوم تساوي مجموع كتل بروتونين ونيوترونين فسوف تتوقع أن كتلة النواة 4.031882 u، لكن القياس الدقيق يُظهر أن كتلة نواة الهيليوم الفعلية 4.002603 u فقط. إن الكتلة الفعلية لنواة الهيليوم، أقل من كتل النيوكليونات المكوّنة لها بمقدار 0.029279 u، ويسمى الفرق بين مجموع كتل النيوكليونات المفردة المكونة للنواة والكتلة الفعلية لها **نقص الكتلة**.

تطبيق الفيزياء

القوى

البوزترون عبارة عن إلكترون موجب الشحنة. وقوة التجاذب الكهرومغناطيسية بين الإلكترون والبوزترون أكبر بمقدار 4.2×10^{42} مرة من قوة الجاذبية بين كتلتيهما.

تقاس الكتل عادةً بوحدة الكتلة الذرية ويكون من المفيد أحيانًا تحديد مقدار الطاقة المكافئة لـ 1u $(1.6605 \times 10^{-27}\ \text{kg})$ بوحدة الجول.

$$E = mc^2$$
$$= (1.6605 \times 10^{-27}\ \text{kg})\ (2.9979 \times 10^{8}\ \text{m/s})^2$$
$$= 1.4924 \times 10^{-10}\ \text{kg.}\ \text{m}^2/\text{s}^2$$
$$= 1.4924 \times 10^{-10}\ \text{J}$$

كما يمكن استخدام وحدات أخرى مثل وحدة الإلكترون فولت.

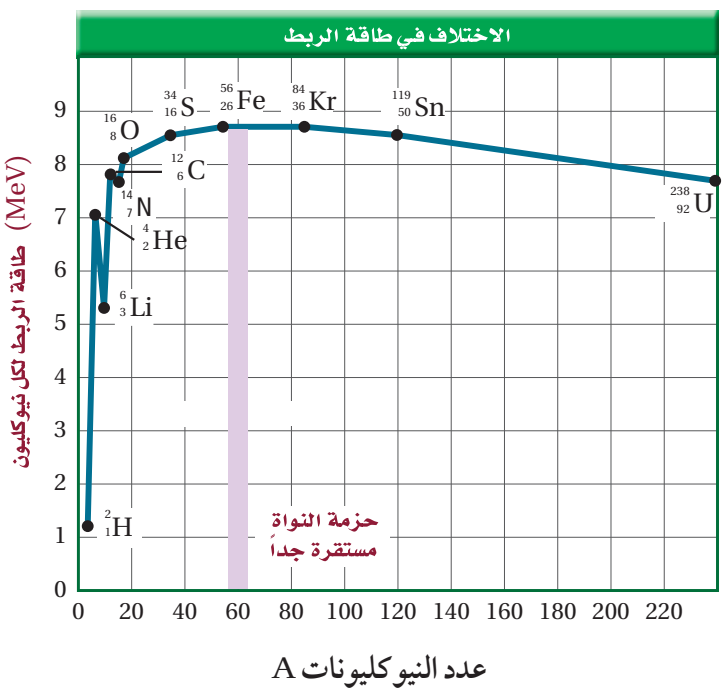
$$E = (1.4924 \times 10^{-10}\ \text{J})(1\ \text{eV}/1.60217 \times 10^{-19}\ \text{J})$$
$$= 9.3149 \times 10^{8}\ \text{eV}$$
$$= 931.49\ \text{MeV}$$

أي أن 1u من الكتلة تكافئ 931.49 MeV من الطاقة.

يبين **الشكل 2–3** كيف تعتمد طاقة الربط النووية على كتلة النواة، إن الأنوية الثقيلة ترتبط غالبًا بقوة أكبر من الأنوية الخفيفة، وتصل طاقة الربط لكل نوية إلى أقصى حد عند العدد الكتلي 56، الذي يمثل عدد النيوكليونات للحديد Fe. ونواة الحديد $^{56}_{26}\text{Fe}$ من أكثر الأنوية ترابطًا، لذلك تصبح الأنوية أكثر استقرارًا، كلما اقترب عددها الكتلي من العدد الكتلي للحديد. والأنوية التي أعدادها الكتلية أكبر أو أقل من العدد الكتلي للحديد تكون أقل ترابطًا، لذا تكون أقل استقرارًا.

يحدث التفاعل النووي طبيعيًّا، إذا تحررت طاقة نتيجة التفاعل، وهذا يعني أنه إذا تحوّل موقع نواة عددها الكتلي أقل من العدد الكتلي لنواة الحديد إلى موقع أقرب من النقطة العظمى للمنحنى البياني عند A = 56، فإن تفاعلًا نوويًّا طبيعيًّا يحدث لها.

فمثلاً يتحول الهيدروجين في الشمس، والنجوم الأخرى إلى هيليوم وكربون وبعض العناصر الأثقل الأخرى في تفاعلات تحرر طاقة، مولدة إشعاعًا كهرومغناطيسيًّا.



الشكل 2–3 طاقة الربط لكل نوية تعتمد على عدد النيوكليونات A، وتكتسب الأنوية الخفيفة استقرارها من خلال الاندماج النووي، بينما تكتسب الانوية الثقيلة استقرارها من خلال الانشطار النووي.

وكذلـك عند الأعداد الكتلية الأكـبر من 56، يحدث تفاعل نووي طبيعي، فعندما يضمحل اليورانيـوم 238 إلى الثوريـوم 234، فإن نواة الثوريوم الناتجة تكون أكثر اسـتقرارًا من نواة اليورانيوم، وتتحرر الطاقة على شـكل جسـيم مشع ذي كتلة وطاقة حركية. ولكن لا يتحوّل الثوريوم تلقائيًّا إلى اليورانيوم؛ لأنه يجب أن تضاف طاقة إلى النواة لحدوث ذلك. وقد ولدَّت أنويـة عنـاصر ثقيلة موجودة في الجدول الدوري بهذه الطريقـة، وعمومًا فإن العناصر الثقيلة قـد تتكـون لعدة أجزاء مـن الثانية فقط، قبل أن تضمحـل إلى أنوية أصغر، وأكثر اسـتقرارًا. وعندما تكتسـب الأنوية الصغيرة نيوكليونات، فـإن طاقة الربط النووية للنواة الأكبر، تكون أكثر سالبية، لذا تكون أكثر استقرارًا من مجموع طاقات الربط للأنوية الأخف.

مثـــال 1

نقص الكتلة وطاقة الربط النووية أوجد نقص الكتلة وطاقة الربط النووية للتريتيوم $^{3}_{1}H$. إذا كانت كتلة نظير التريتيوم 3.016049 u وكتلة ذرة الهيدروجين 1.007825 u وكتلة النيوترون 1.008665 u

1 تحليل المسألة ورسمها

المعلوم	المجهول
كتلة ذرة الهيدروجين الواحدة = 1.007825 u	كتلة النيوكليونات والإلكترون الكلية = ؟
كتلة النيوترون الواحد = 1.008665 u	نقص الكتلة = ؟
كتلة التريتيوم = 3.016049 u	طاقة الربط النووية للتريتيوم = ؟
طاقة الربط النووية 1 u = 931.49 MeV	

2 إيجاد الكمية المجهولة

اجمع كتل ذرة الهيدروجين (بروتون واحد وإلكترون واحد) ونيوترونين.

كتلة ذرة هيدروجين + كتلة نيوترونين تساوي:

$$\begin{array}{r} 1.007825\ u \\ +\ 2.017330\ u \\ \hline 3.025155\ u \end{array}$$

كتلة النيوكليون الكلية:

نقص الكتلة يساوي كتلة التريتيوم الفعلية ناقص مجموع كتل مكوّناته

كتلة التريتيوم: كتلة النيوكليونات تساوي:

$$\begin{array}{r} 3.016049\ u \\ -\ 3.025155\ u \\ \hline -0.009106\ u \end{array}$$

نقص الكتلة :

طاقة الربط النوية هي الطاقة المكافئة لمقدار نقص الكتلة.

$E =$ (طاقة الربط النووية لـ 1 u)(نقص الكتلة u)

$E = (-0.009106\ u)\ (931.49\ MeV/u)$ بالتعويض عن نقص الكتلة = -0.009106 u

$E = -8.4821\ MeV$ طاقة الربط لكل u = 931.49 MeV

3 تقويم الجواب

- **هل الوحدات صحيحة؟** تقاس الكتلة بوحدة u، وتقاس الطاقة بوحدة MeV.
- **هل للإشارة معنى؟** يجب أن تكون طاقة الربط سالبة.
- **هل الجواب منطقي؟** اعتمادًا على الشكل 2–3 فإن طاقة الربط لكل نيوكليون في المدى بين -2 MeV و -3 MeV، لذلك فالجواب للنيوكليونات الثلاثة منطقي.

مسائل تدريبية

استخدم القيم المبينة أدناه لحل المسائل التالية:

كتلة الهيدروجين تساوي 1.007825 u، وكتلة النيوترون تساوي 1.008665 u، و $1u = 931.49\ MeV$

4. كتلة نظير الكربون $^{12}_{6}C$ تساوي 12.0000 u، احسب:

a. نقص الكتلة.

b. طاقة الربط النووية بوحدة MeV

5. نظير الهيدروجين الذي يحتوي على بروتون واحد ونيوترون واحد يسمى ديوتيريوم، كتلة ذرته 2.014102 u، ما مقدار:

a. نقص كتلته؟

b. طاقة الربط للديوتيريوم بوحدة MeV؟

6. يحتوي نظير النيتروجين $^{15}_{7}N$ على سبعة بروتونات، وثمانية نيوترونات، وكتلته 15.010109 u، احسب:

a. نقص الكتلة لهذه النواة.

b. طاقة الربط النووية لهذه النواة.

7. إذا كانت الكتلة النووية لنظير الأكسجين $^{16}_{8}O$ تساوي 15.994915 u ما مقدار:

a. نقص الكتلة لهذا النظير؟

b. طاقة الربط النووية لهذا النظير؟

في مجال الفيزياء النووية بدأ استخدام عنصر الراديوم المشع في الطب خلال عشرين عامًا من اكتشافه. واستخدمت مسارعات البروتون في التطبيقات الطبية، بعد أقل من عام من اختراعها. وبدأ التطبيق العسكري للانشطار النووي (انقسام الأنوية) وما زال تحت التطوير، حتى قبل أن تعرف الأساسيات الفيزيائية. وقد تبعتها التطبيقات السلمية بعد أقل من عشر سنوات.

3–1 مراجعة

8. **الأنوية** لاحظ أزواج الأنوية التالية: $^{12}_{6}C$ ، $^{13}_{6}C$ و $^{11}_{6}C$ ، $^{11}_{5}B$ بماذا يتشابه كل زوج منها، وبماذا يختلف؟

9. **طاقة الربط النووية** عندما يضمحل نظير التريتيوم $^{3}_{1}H$ فإنه ينبعث جسيم بيتا، ويصبح $^{3}_{2}He$، أي نواة تتوقع أن يكون لها أكبر طاقة ربط نووية؟

10. **الطاقة النووية القوية** مدى الطاقة النووية القوية قصير جدًّا؛ حيث إن النيوكليونات القريبة جدًّا بعضها من بعض تتأثر بهذه القوة. استخدم هذه الحقيقة في تفسير سبب تغلب قوة التنافر الكهرومغناطيسية على قوة التجاذب القوية في الأنوية الثقيلة، مما يجعل النواة غير مستقرة.

11. **نقص الكتلة** أي النواتين في المسألة 9 لها نقص كتلة أكبر؟

12. **نقص الكتلة وطاقة الربط** إذا علمت أن كتلة نظير الكربون المشع $^{14}_{6}C$ تساوي 14.003074، فاحسب مقدار:

a. نقص الكتلة لهذا النظير.

b. طاقة الربط النووية لهذا النظير.

13. **التفكير الناقد** في النجوم المتقدمة في العمر، ليس فقط الهيليوم والكربون ينتجان عن طريق اتحاد أنوية مترابطة معًا بشدة، ولكن ينتج الأكسجين $(Z = 8)$ والسيليكون $(Z = 14)$ أيضًا. ما العدد الذري للنواة الثقيلة التي يمكن أن تتكون بهذه الطريقة؟ فسّر.

في عام 1896م عمل بيكرل بمركبات تحتوي على عنصر اليورانيوم. وقد فوجئ عندما وجد أن لون الصفائح الفوتوجرافية التي كانت تغطي اليورانيوم، وتحجب الضوء عنه أصبح ضبابيًّا، ودل اللون الضبابي هذا على أن نوعًا من الأشعة المنبعثة من اليورانيوم قد نفذت من الصفيحة التي تغطيه. وقد وجد أن بعض المواد الأخرى غير اليورانيوم أو مركباته قادرة على أن تبعث مثل هذه الأشعة النافذة. والمواد التي تطلق مثل هذا النوع من الإشعاع تسمى (المواد المشعة). وبسبب انبعاث جسيمات من هذه المواد فقد قيل إنها تضمحل؛ حيث تضمحل النواة عندما تنتقل من حالة أقل استقرارًا، إلى حالة أكثر استقرارًا، تلقائيًّا.

الاضمحلال الإشعاعي Radioactive Decay

في عام 1899م، اكتشف العالم رذرفورد ورفاقه أن عنصر الرادون يتحول تلقائيًّا إلى نواة أخف وإلى نواة هيليوم خفيفة. وفي العام نفسه اكتشف أيضًا أن مركبات اليورانيوم تنتج ثلاثة أنواع مختلفة من الإشعاع، فُصل بينها اعتمادًا على قدرتها على اختراق المواد. وقد أطلق عليها اسم إشعاعات α (ألفا)، و β (بيتا) و γ (جاما). حيث يمكن إيقاف جسيمات ألفا عند اصطدامها بصفيحة رقيقة من الورق، بينما يلزم سمك 6 mm من الألومنيوم لإيقاف معظم جسيمات بيتا، ويلزم سمك عدة سنتمترات من الرصاص لإيقاف إشعاع جاما.

أنواع الإشعاع Types of Radioaction

انبعاث ألفا جسيم ألفا عبارة عن نواة هيليوم $^{4}_{2}He$، ويطلق على عملية انبعاث جسيمات ألفا من أنوية الذرات المشعة **انبعاث ألفا**. العدد الكتلي لجسيم ألفا $^{4}_{2}He$ هو 4، والعدد الذري له 2، فعندما تطلق النواة جسيم ألفا فإن عددها الكتلي A ينقص بمقدار 4، بينما ينقص العدد الذري Z لها بمقدار 2، فيتحوّل العنصر إلى عنصر مختلف. وعلى سبيل المثال يتحوّل اليورانيوم $^{238}_{92}U$ إلى ثوريوم $^{234}_{90}Th$ نتيجة انبعاث ألفا.

انبعاث بيتا جسيمات بيتا عبارة عن إلكترونات تنبعث من النواة. لا تحتوي النواة على إلكترونات، فمن أين تأتي هذه الإلكترونات؟ يحدث **انبعاث بيتا** عندما يتحول النيوترون إلى بروتون داخل النواة. في جميع التفاعلات يجب أن تبقى الشحنة محفوظة، لذا فإن الشحنة قبل التفاعل يجب أن تساوي الشحنة بعد التفاعل؛ فعندما تحدث عملية انبعاث بيتا يتحول النيوترون إلى بروتون وينتج أيضًا إلكترون. في هذا الاضمحلال تنتهي نواة عدد نيوتروناتها N وعدد بروتوناتها Z متحولة إلى نواة جديدة عدد نيوتروناتها N-1، وعدد بروتوناتها Z+1، مع ظهور جسيم آخر يدعى أنتي (ضديد) نيوترينو $^{0}_{0}\bar{\nu}$ مرافقًا لانبعاث بيتا.

انبعاث جاما تنبعث أشعة **جاما** نتيجة إعادة توزيع الطاقة داخل النواة. وإشعاع جاما عبارة عن فوتونات ذات طاقة عالية. ونتيجة لذلك لا يتغير العدد الكتلي أو العدد الذري للنواة المضمحلة. ويرافق إشعاع جاما عادة اضمحلال ألفا أو بيتا. وقد تم تلخيص خواص أنواع الانبعاثات الثلاثة للإشعاع في **الجدول 1–3**.

تمر العناصر المشعة خلال سلسلة الاضمحلالات الإشعاعية لتكوّن نواة مستقرة في النهاية. فاليورانيوم $^{238}_{92}U$ عندما يضمحل مثلاً يخضع إلى 14 انبعاثًا قبل أن ينتج نظير الرصاص $^{206}_{82}Pb$ المستقر.

الفيزياء في حياتك:

يمكن للاندماج النووي أن يؤدي، إلى جانب الانشطار النووي، دورًا في التخفيف من حدّة تغير المناخ في المستقبل باعتبارهما من مصادر الطاقة منخفضة الكربون. ولا تنجم عنه انبعاثات من ثاني أكسيد الكربون أو غيره من غازات الدفيئة إلى الغلاف الجوي.

تساؤلات جوهرية:

- ما خصائص الأنواع الرئيسة للاضمحلال الإشعاعي؟
- ما هو عمر النصف للنظير؟
- كيف تنبعث الطاقة من الانشطار النووي؟
- كيف تنبعث الطاقة من الاندماج النووي؟

المفردات:

- المواد المشعة
- انبعاث ألفا
- انبعاث بيتا
- انبعاث جاما
- عمر النصف
- النشاطية
- التفاعل النووي
- الانشطار النووي
- التفاعل المتسلسل
- الاندماج النووي

الجدول 1 –3			
الخاصية	أشعة ألفا	أشعة بيتا	أشعة جاما
الرمز	α	β	γ
التركيب	جسمات ألفا	جسيمات بيتا	أشعة كهرومغناطيسية عالية الطاقة
وصف الإشعاع	نواة الهيليوم $^{4}_{2}He$	الكترونات	فوتونات
الشحنة	$+2$	-1	0
الكتلة	$6.64x10^{-27}$ kg	$9.11x10^{-31}$ kg	0
الطاقة القصوى	5 MeV	$(0.05 - 1)$ MeV	1 MeV
قوة النفاذ النسبية	يمكن حجزها بورقة	يمكن حجزها بصفيحة الومنيوم	قد تخترق عدة سنتمترات من الرصاص

التفاعلات والمعادلات النووية
Nuclear Reactions and Equations

يحدث **التفاعل النووي** عندما تتغير طاقة النواة أو عدد النيوترونات أو عدد البروتونات فيها. وكما في التفاعلات الكيميائية، فإن بعض التفاعلات النووية ينتج عنها طاقة، بينما تحتاج تفاعلات أخرى للطاقة كي تحدث.

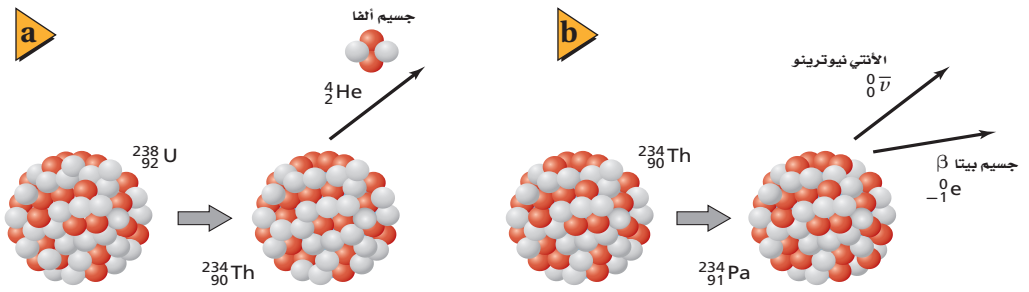
تتضمن بعض أنواع التفاعلات النووية انبعاث جسيمات بوساطة النشاط الاشعاعي للأنوية المشعة، ويرافق انبعاث هذه الجسيمات انطلاق طاقة زائدة على شكل طاقة حركية. ويمكن وصف التفاعلات النووية باستخدام الكلمات، والتمثيل البياني، أو المعادلات. فيمكن التعبير عن التفاعل النووي الموضح في **الشكل 3–3a** كما يلي:

$$^{238}_{92}U \longrightarrow ^{234}_{90}Th + ^{4}_{2}He$$

وخلال اضمحلال بيتا ينتج إلكترون $^{0}_{-1}e$ ، والأنتي نيوترونيو $^{0}_{0}\bar{\nu}$. وعملية تحوّل ذرة الثوريوم بانبعاث جسيم بيتا أيضًا موضحة في **الشكل 3–3b**، كما يمكن التعبير عنها كما يلي:

$$^{234}_{90}Th \longrightarrow ^{234}_{91}Pa + ^{0}_{-1}e + ^{0}_{0}\bar{\nu}$$

وتخضع جميع التفاعلات النووية لمبادئ حفظ الكميات، ومنها مبدأ حفظ الشحنة ومبدأ حفظ العدد الكتلي، لذلك فإن مجموع الأعداد العلوية في طرف المعادلة الأيسر، يساوي مجموع الأعداد العلوية في الطرف الأيمن للمعادلة. وهناك أيضًا مساواة بين الأعداد السفلية في طرفي المعادلة.



الشكل 3–3 انبعاث جسيم ألفا بوساطة عنصر اليورانيوم– 238 ينتج عنه تكوّن الثوريوم 234 (a). انبعاث جسيم بيتا بوساطة عنصر الثوريوم – 234 ينتج عنه تكوّن البروتكتانيوم – 234 (b).

مثـــال 2

انبعاث ألفا وبيتا اكتب المعادلة النووية لكل من التحولات الإشعاعية التالية:

a. نظير الراديوم المشع $^{226}_{88}Ra$ ، يبعث جسيم ألفا؛ ليتحول إلى نظير الرادون $^{222}_{86}Rn$

b. نظير الرصاص المشع $^{209}_{82}Pb$ ، يبعث جسيم بيتا، وأنتي نيوترينو ليتحول إلى نظير البزموث $^{209}_{83}Bi$

1 تحليل المسألة ورسمها

	المعلوم	المجهول
a.	$^{226}_{88}Ra \rightarrow$ جسيم α + $^{222}_{86}Rn$ جسيم $\alpha = {}^{4}_{2}He$	هل هذا الاضمحلال ممكن؟
b.	$^{209}_{82}Pb \rightarrow {}^{209}_{83}Bi +$ جسيم β + أنتي نيوترينو جسيم $\beta = {}^{0}_{-1}e$ ، أنتي نيوترينو $= {}^{0}_{0}\bar{\nu}$	هل هذا الاضمحلال ممكن؟

2 إيجاد الكمية المجهولة

a. عوّض $^{4}_{2}He$ لجسيم α $\quad {}^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{222}_{86}Rn$

b. عوّض $^{0}_{-1}e$ لجسيم β و $\bar{\nu}$ للأنتي نيوترينو $\quad {}^{209}_{82}Pb \rightarrow {}^{209}_{83}Bi + {}^{0}_{-1}e + {}^{0}_{0}\bar{\nu}$

3 تقويم الجواب

- **هل عدد النيوكليونات محفوظ؟**

a. $4 + 222 = 226$، لذلك فإن العدد الكتلي محفوظ.

b. $0 + 0 + 209 = 209$، لذلك فإن العدد الكتلي محفوظ.

- **هل الشحنة محفوظة؟**

a. $88=2+86$، لذلك فإن الشحنة محفوظة.

b. $82=83-1+0$، لذلك فإن الشحنة محفوظة.

مسائل تدريبية

14. اكتب المعادلة النووية لتحول نظير اليورانيوم المشع $^{234}_{92}U$ إلى نظير الثوريوم $^{230}_{90}Th$ ، بانبعاث جسيم ألفا.

15. اكتب المعادلة النووية، لتحول نظير الثوريوم المشع $^{230}_{90}Th$ ، إلى نظير الراديوم المشع $^{226}_{88}Ra$ ، بانبعاث جسيم ألفا.

16. يتحول نظير الرصاص المشع $^{214}_{82}Pb$ ، إلى نظير البزموث المشع $^{214}_{83}Bi$ ، بانبعاث جسيم بيتا وأنتي نيوترينو. اكتب المعادلة النووية.

عند انبعاث جسيمات ألفا أو بيتا، تظهر في الطرف الأيسر من المعادلة نواة واحدة تضمحل إلى نـواة أخـرى، بالإضافة إلى جسـيم واحد أو أكثر من الجسـيمات المشـعة التـي تظهر في الطرف الأيمن من المعادلة. مثال آخر على التحوّل، يحدث عندما يصطدم جسـيم مع نواة ينتـج عنه غالبًا انبعاث جسـيمات أخرى، كما في المعادلـة $^{12}_{6}C + {}^{1}_{1}H \longrightarrow {}^{13}_{7}N$. ومثل هذه التفاعلات موضحة في المثال التالي، وكذلك في مناقشـة موضوع الانشـطار النووي لاحقًا في الفصل.

مثـــال 3

حل المعادلات النووية عند قذف غاز النيتروجين بجسيمات ألفا ينبعث بروتونات ذات طاقة عالية. ما العنصر الجديد الناتج؟

1 تحليل المسألة ورسمها

المعلوم

نيتروجين = $^{14}_{7}N$ ، ألفا = $^{4}_{2}He$

بروتون = $^{1}_{1}H$

المجهول

ما العنصر الذي يتولد في الطرف الأيمن للمعادلة.

2 إيجاد الكمية المجهولة

اكتب معادلة التفاعل النووي.

$$^{4}_{2}He + ^{14}_{7}N \longrightarrow ^{1}_{1}H + ^{A}_{Z}X$$

حل المعادلة بالنسبة للعدد Z والعدد A.

$$Z = 2 + 7 - 1 = 8 \qquad A = 4 + 14 - 1 = 17$$

استخدم الجدول الدوري. العنصر ذو العدد الذري Z = 8 هو الأكسجين. والنظير يجب أن يكون $^{17}_{8}O$

3 تقويم الجواب

- **هل المعادلة موزونة؟** عدد النيوكليونات محفوظ: 17 + 1 = 14 + 4. الشحنة محفوظة: 8 + 1 = 7 + 2

مسائل تدريبية

17. استخدم الجدول الدوري لإكمال المعادلتين النوويتين التاليتين:

a. $^{14}_{6}C \longrightarrow X + ^{0}_{-1}e + ^{0}_{0}\bar{\nu}$

b. $^{55}_{24}Cr \longrightarrow Y + ^{0}_{-1}e + ^{0}_{0}\bar{\nu}$

18. اصطدم بروتون بنظير النيتروجين $^{15}_{7}N$، فتكوّن عنصر جديد وجسيم ألفا. ما العنصر الناتج؟ اكتب معادلة نووية تبين ذلك.

19. اكتب المعادلات النووية لانبعاث جسيم بيتا من العناصر التالية:

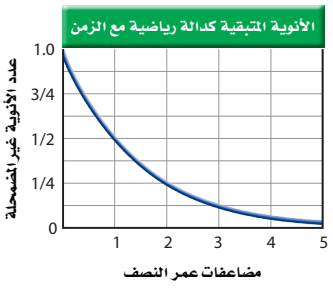
a. $^{210}_{83}Bi$ **b.** $^{234}_{90}Th$ **c.** $^{239}_{93}Np$

عمر النصف Half – Life

تسمى الفترة الزمنية اللازمة لاضمحلال نصف ذرات أي كمية من نظير العنصر المشع **عمر النصف** لذلك العنصر. بعد مرور فترة عمر النصف كاملة يقل عدد الأنوية غير المضمحلة إلى النصف، كما هو موضح في **الشكل 4–3**. ولكل نظير مشع عمر نصف خاص به.

فعمر النصف لنظير الراديوم $^{226}_{88}Ra$ مثلاً 1600 سنة. وبذلك فإن كل 1600 سنة يضمحل نصف الكمية المعطاة من الراديوم $^{226}_{88}Ra$ إلى عنصر آخر، هو الرادون، وبعد 1600 سنة أخرى يضمحل نصف عينة الراديوم المتبقية. أي أنه بعد مرور 3200 سنة يبقى ربع الكمية الأصلية. وفي المقابل، تضمحل عينة من البولونيوم–210 إلى ربع الكمية الأصلية خلال 276 يومًا فقط.

الشكل 4–3 اضمحلال النواة المشعة إلى حالات أكثر استقرارًا.



الجدول 2–3			
عمر النصف لنظائر مختارة			
العنصر	النظير	عمر النصف	الإشعاع الناتج
ترينيوم	$^{3}_{1}H$	12.3 yr	β
كربون	$^{14}_{6}C$	5730 yr	β
كوبلت	$^{60}_{27}Co$	5.272 yr	β, γ
يود	$^{131}_{53}I$	8.07 days	β, γ
رصاص	$^{212}_{82}Pb$	10.6 h	β
بولونيوم	$^{194}_{84}Po$	0.7 s	α
بولونيوم	$^{210}_{84}Po$	138 day	α, γ
يورانيوم	$^{235}_{92}U$	7.1×10^{8}yr	α, γ
يورانيوم	$^{238}_{92}U$	4.51×10^{9}yr	α, γ
بلوتونيوم	$^{236}_{94}Pu$	2.85 yr	α
بلوتونيوم	$^{242}_{94}Pu$	3.79×10^{5}yr	α, γ

من خلال أعمار النصف للنظائر المختارة الموضحة في **الجدول 2–3**. إذا عرفت الكمية الأصلية للمادة المشعة الأصلية، وعمر نصفها، فإنك تستطيع حساب الكمية المتبقية بعد عدد معين من أعمار النصف.

الكمية المتبقية من العنصر المشع: $N= N_0 (1/2)^n$

حيث أن N الكمية المتبقية و N_0 الكمية الأولية و n عدد فترات عمر النصف التي انقضت.

تستخدم أعمار النصف للنظائر المشعة لتحديد عمر الأجسام. فيمكن إيجاد عمر عينة من مادة عضوية بقياس كمية الكربون– 14 المتبقية. ويمكن حساب عمر الأرض اعتمادًا على اضمحلال اليورانيوم إلى الرصاص.

يسمى معدل الاضمحلال، أو عدد انحلالات المادة المشعة كل ثانية **النشاطية**. وتتناسب النشاطية طرديًّا مع عدد الذرات المشعة الموجودة. لذلك فإن النشاطية الإشعاعية لعينة معينة تقل أيضًا بمقدار النصف خلال عمر نصف واحد. تأمل النظير $^{131}_{53}I$ الذي عمر النصف له 8.07 أيام. فإذا كانت النشاطية لعينة معينة من اليود –131 تساوي 8×10^5 اضمحلال/ ثانية، فسوف تكون نشاطيتها بعد انقضاء 8.07 أيام أخرى 4×10^5 اضمحلال/ ثانية؛ وبعد 8.07 أيام أخرى تكون نشاطيتها 2×10^5 اضمحلال/ ثانية، فنشاطية العينة ترتبط أيضًا مع عمر النصف. فعمر النصف الأقصر يعني نشاطية أكبر. فإذا عرفت نشاطية مادة معينة، وكتلة تلك المادة، فإنك تستطيع تحديد عمر النصف لها. ووحدة الاضمحلال لكل ثانية في النظام الدولي للوحدات SI هي البيكرل(Bq).

التجربة العملية:

كيف أحمي نفسي من النشاط الإشعاعي؟

مسائل تدريبية

ارجع إلى الشكل 4–3 والجدول 2–3 لحل المسائل التالية:

20. تولدت عينة تريتيوم $^{3}_{1}H$ كتلتها 1.0 g، ما كتلة التريتيوم التي تتبقى بعد مرور 24.6 سنة؟

21. عمر النصف لنظير النبتونيوم $^{238}_{93}Np$ هو 2.0 يوم. فإذا أنتجت عينة كتلتها 4.0 g من النبتونيوم يوم الإثنين، فما الكتلة التي ستبقى منه يوم الثلاثاء من الأسبوع التالي؟

22. تم شراء عينة من البولونيوم 210 بتاريخ 9/ 1، وكانت نشاطيتها 2×10^6 Bq، استخدمت العينة لإجراء تجربة في 6/ 1 من السنة التالية. ما النشاطية المتوقعة للعينة؟

23. استخدم التريتيوم $^{3}_{1}H$ في العقود الأولى من القرن الماضي في بعض ساعات اليد لتوليد التوهج الفلوري؛ لكي تستطيع قراءة الوقت في الظلام. إذا كان سطوع التوهج يتناسب طرديًّا مع نشاطية التريتيوم، فكيف يكون سطوع هذه الساعة، بالمقارنة مع سطوعها الأصلي عندما يكون عمر الساعة ست سنوات؟

النشاط الإشعاعي الاصطناعي Artificial Radioactivity

يمكن إنتاج نظائر مشعة من العناصر المستقرة بقذفها بجسيمات ألفا، أو ببروتونات، أو إلكترونات أو أشعة جاما؛ حيث تطلق الأنوية غير المستقرة الناتجة إشعاعات، حتى تتحول إلى نظائر مستقرة. ويمكن للأنوية المشعة أن تبعث جسيمات ألفا، وجسيمات بيتا، وإشعاع جاما. بالإضافة إلى النيوترينو، والأنتي نيوترينو، والبوزترونات.

تستخدم النظائر المشعة المنتجة اصطناعيًّا غالبًا في البحوث الدوائية والطبية. ففي العديد من التطبيقات الطبية يُحقن المرضى نظائر مشعة تمتصها أعضاء محددة من الجسم. ويستخدم الأطباء عدّاد الإشعاع لمراقبة الإشعاع في العضو الذي يخضع للعلاج. وبعض النظائر المشعة تتعلق بالجزيء الذي سيُمتص في منطقة العلاج، كما يحدث في تطبيق انبعاث البوزوترون في عملية التصوير الإشعاعي المقطعي، الذي يعرف بشكل أفضل بالتصوير الطبقي للدماغ PET كما هو موضح في **الشكل 5–3**.

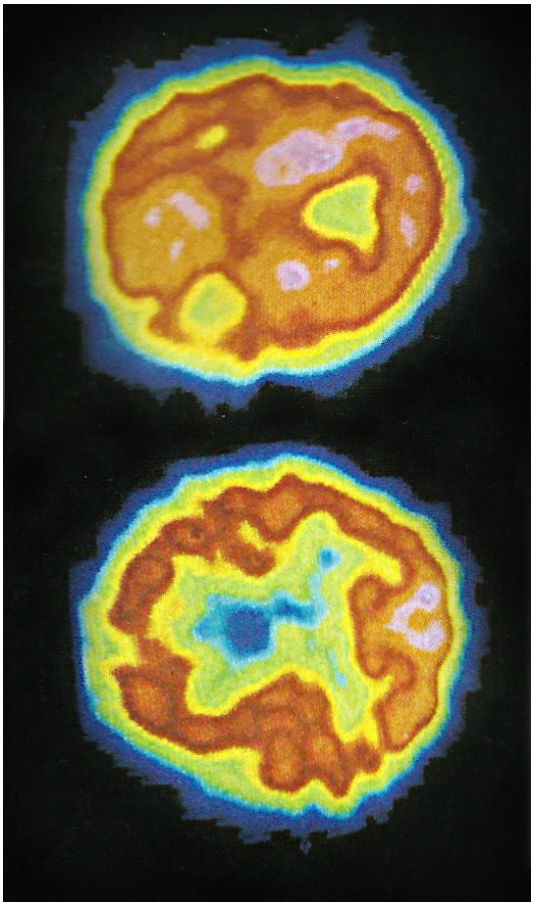
وكثيرًا ما يستخدم الإشعاع لتدمير الخلايا السرطانية؛ فهذه الخلايا أكثر حساسية لتأثيرات التدمير الإشعاعي؛ لأنها تنقسم غالبًا أكثر من الخلايا الطبيعية. وتستخدم أشعة جاما المنبعثة من نظير الكوبلت $^{60}_{27}Co$ لمعالجة مرضى السرطان. ويحقن نظير اليود المشع في الغدة الدرقية المصابة بالسرطان.

وفي تطبيق ثالث، توجَّه الجسيمات الناتجة في مسارع الجسيمات على شكل شعاع إلى داخل النسيج بطريقة معينة، بحيث تضمحل في النسيج المصاب بالسرطان، فتدمر خلاياه.

تطبيق الفيزياء

العلاج بالأشعة

أشعة جاما تدمر الخلايا السرطانية والخلايا السليمة لذلك يجب أن يُوجه الاشعاع مباشرة إلى الخلايا السرطانية فقط.



الشكل 5–3 من أجل إجراء التصوير الطبقي للدماغ يقوم الأطباء بحقن سائل يحوي نظائر مشعة مثل $^{18}_{9}F$ ترتبط مع الجزيء الذي سوف يتركز في الأنسجة تحت العلاج. عندما يضمحل $^{18}_{9}F$ ينتج بوزترونات تفنى عندما تتحد مع الإلكترونات منتجة أشعة جاما، التي يكشف عنها بجهاز التصوير الطبقي. بعد ذلك يكوّن الحاسوب خريطة ثلاثية الأبعاد لتوزيع النظير. دماغ طبيعي — في أعلى الشكل — ودماغ شخص يعاني من داء الخرف — في أسفل الشكل —.

الانشطار النووي Nuclear Fission

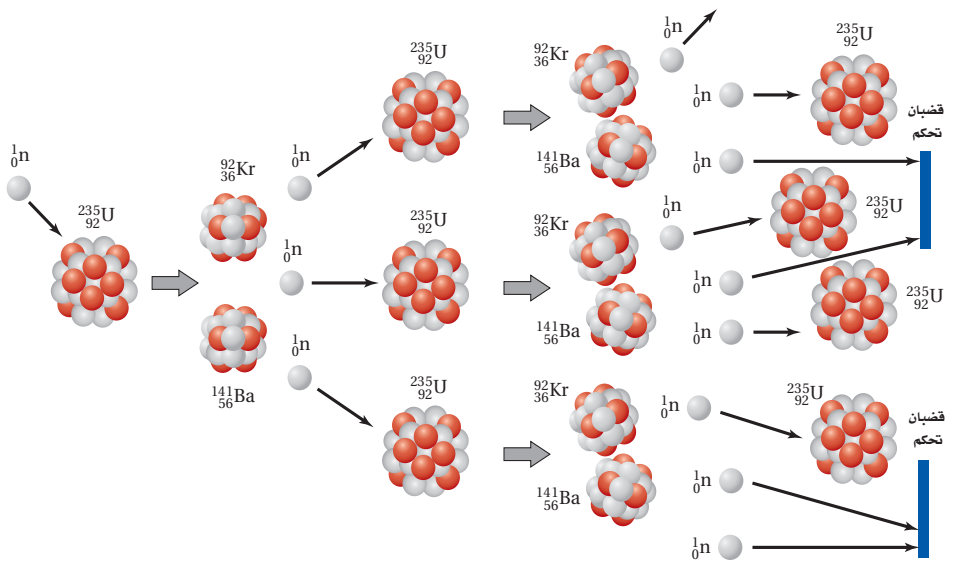
أنتج كل من العالمين أنريكو فيرمي، وأميليو سيرجي في ايطاليا عام 1934م العديد من النظائر المشعة الجديدة بقذف اليورانيوم بالنيوترونات؛ مما يسبّب انقسامها إلى نواتين أصغر، وإنتاج طاقة كبيرة جدًّا، ويسمى مثل هذا الانقسام للنواة الثقيلة إلى نواتين أو أكثر **الانشطارالنووي**. وقد أدرك الكثير من العلماء إمكانية ألا يكون الانشطار النووي مصدرًا للطاقة فقط، ولكن أيضًا يمكن أن يكوّن أسلحة متفجرة.

يحدث الانشطار النووي لليورانيوم، عندما تنشطر نواة نظير اليورانيوم إلى نواتي عنصري الباريوم والكربتون عند قذفها بنيوترون بطيء. والمعادلة النووية التالية توضح هذا التفاعل:

$$^{1}_{0}n + ^{235}_{92}U \longrightarrow ^{92}_{36}Kr + ^{141}_{56}Ba + 3\,^{1}_{0}n + 200\ MeV$$

ويمكن إيجاد الطاقة المتحررة نتيجة كل انشطار بحساب كتل الذرات في كل من طرفي المعادلة. ففي تفاعل اليورانيوم– 235، تكون الكتلة الكلية في الطرف الأيمن للمعادلة أقل بمقدار 0.215 u من الكتلة الكلية في الطرف الأيسر. والطاقة المكافئة لهذه الكتلة هي 3.21×10^{-11} J، أو 2.00×10^{2} MeV، وهذه الطاقة تظهر على شكل طاقة حركية لنتائج الانشطار.

عندما يُحدث النيوترون الواحد انشطارًا نوويًّا، فإن ذلك الانشطار يحرر ثلاثة نيوترونات، كل منها يستطيع أن يُحدث انشطارًا جديدًا، وهكذا. وتسمى العملية المستمرة في تفاعلات الانشطار المتكررة التي تسبب تحرير نيوترونات من تفاعلات الانشطار السابقة **التفاعل المتسلسل**. وهذه العملية موضحة في **الشكل 6–3**.



الشكل 6–3 تفاعل الانشطار النووي المتسلسل لليورانيوم–235 الذي يحدث في قلب المفاعل النووي.

المفاعلات النووية Nuclear Reactors

لإحداث تفاعل متسلسل مسيطر عليه بحيث تستخدم الطاقة الناتجة في الاغراض السلمية، تحتاج النيوترونات للتفاعل مع اليورانيوم المنشطر بمعدل مناسب؛ فمعظم النيوترونات المحررة نتيجة انشطار ذرات اليورانيوم $^{235}_{92}U$ تتحرك بسرعات عالية جدًّا، وهذه النيوترونات تسمى النيوترونات السريعة. وبالإضافة إلى ذلك فإن اليورانيوم الذي يوجد طبيعيًّا يحتوي على أقل من 1% من نظير اليورانيوم $^{235}_{92}U$ وأكثر من 99% من نظير اليورانيوم $^{238}_{92}U$، وعندما تمتص نواة $^{238}_{92}U$ نيوترونًا سريعًا فإنها لاتنشطر، ولكنها تصبح نظيرًا جديدًا $^{239}_{92}U$، إن امتصاص النيوترونات بوساطة $^{238}_{92}U$ يمنع معظم النيوترونات من الوصول إلى ذرات $^{235}_{92}U$ الانشطارية. ومن ثم فإن معظم النيوترونات المحررة نتيجة انشطار $^{235}_{92}U$ غير قادرة على إحداث انشطار لذرة أخرى من $^{235}_{92}U$.

للسيطرة على التفاعل يفتت اليورانيوم إلى قطع صغيرة توضع في مهدئ، وهي مادة يمكن أن تبطئ النيوترونات السريعة. وعندما يصطدم النيوترون بذرة خفيفة، فإنه ينقل عزمه وطاقته إلى تلك الذرة. وبهذه الطريقة فإن النيوترون يخسر طاقة. وهكذا فإن المهدئ يبطئ الكثير من النيوترونات السريعة، إلى سرعات يمكن عندها امتصاصها بسهولة أكثر بوساطة $^{235}_{92}U$ مقارنة مع $^{238}_{92}U$. إن العدد الأكبر من النيوترونات البطيئة، تزيد إلى حد كبير من احتمال انشطار نواة $^{235}_{92}U$ وقد يحدث تفاعلاً آخر. وإذا توافرت كمية كبيرة من نظير اليورانيوم $^{235}_{92}U$ في العينة، فإنه يمكن أن يحدث تفاعلاً متسلسلاً. ولزيادة نظير اليورانيوم القابل للانشطار يمكن تخصيب اليورانيوم؛ وذلك بإضافة كمية أكبر من $^{235}_{92}U$. علمًا بأن نوعي اليورانيوم كليهما يستخدمان في المفاعلات النووية.

مفاعل الماء المضغوط هو أحد أنواع المفاعلات النووية المستخدمة في الولايات المتحدة الأمريكية، ويحتوي على 200 طن متري من قضبان اليورانيوم المغمورة في الماء، كما في **الشكل 7–3**. لا يعمل الماء مهدئًا فقط، بل ينقل أيضًا الطاقة الحرارية بعيدًا عن انشطار اليورانيوم.

الشكل 7–3 عندما توضع قضبان الوقود داخل الماء تبعث الإلكترونات فوتونات تسبب توهج الماء، ويعود هذا التوهج إلى تأثير كرنيكوف الذي يحدث عندما تدخل جسيمات إلى الماء بسرعة عالية؛ وليس بسبب النشاطية الاشعاعية.

تجربة

نمذجة الاضمحلال الإشعاعي

نحتاج إلى 50 قطعة نقدية معدنية لتمثيل 50 ذرة نظير مشع. في هذا النموذج يمثل أحد وجهي القطعة (الشعار) أنوية غير مضمحلة.

1. **دوّن** 50 (شعارًا) في البداية.
2. ضع القطع النقدية في كأس كبيرة، ثم رج الكأس وأفرغها من القطع. ارفع القطع النقدية التي وجه الكتابة فيها إلى أعلى وضعها جانبًا. وعُدّ ودوّن عدد القطع الباقية.
3. أعد الخطوة 2 باستخدام القطع النقدية التي كان وجهها العلوي شعارًا في الرمية الأخيرة. كل رمية تمثل عمر نصف واحد.

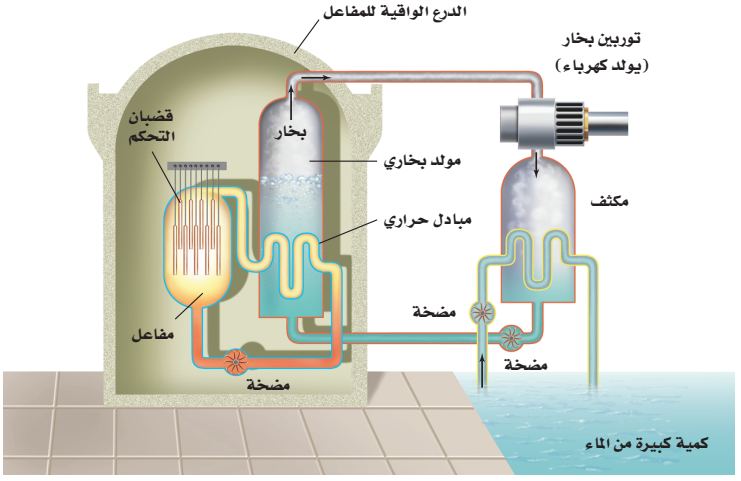
التحليل والاستنتاج

4. **تمثيل بياني** مثّل عدد القطع النقدية في دالة رياضية مع عدد أعمار النصف.
5. **اجمع** النتائج من طلبة آخرين واستخدم المجاميع لعمل تمثيل بياني جديد.
6. **قارن** هذا الرسم البياني مع الرسوم البيانية لزملائك. أيها أكثر تطابقًا مع الرسم البياني النظري في الشكل 4–3؟

توضع قضبان الكادميوم بين قضبان اليورانيوم، وتتحرك إلى داخل وخارج المفاعل للتحكم بمعدل التفاعل المتسلسل؛ لذلك تسمى هذه القضبان قضبان التحكم، فعندما يتم إدخال قضبان التحكم كليًّا داخل المفاعل، فإنها تمتص عددًا كافيًا من النيوترونات المتحررة نتيجة التفاعلات الانشطارية، وبذلك تمنع حدوث تفاعل متسلسل آخر، وعندما ترفع من المفاعل فإن معدل الطاقة المتحررة يزداد بسبب توافر نيوترونات كافية لاستمرار حدوث التفاعل المتسلسل.

تسخن الطاقة المتحررة من الانشطار الماء المحيط بقضبان اليورانيوم، لكن الماء نفسه لا يغلي؛ لأنه تحت ضغط كبير جدًّا، يزيد من درجة غليانه. وكما هو موضح في **الشكل 8–3**. يضخ هذا الماء إلى المبادل الحراري، فيسبب غليان ماء آخر منتجًا بخارًا يعمل على إدارة توربينات موصولة بمولدات لتوليد الطاقة الكهربائية.

إن انشطار نواة $^{235}_{92}U$ ، ينتج ذرات كربتون Kr، وباريوم Ba وبعض الذرات الأخرى في قضبان الوقود. ومعظم هذه الذرات مشعة. وبعد سنة تقريبًا يجب استبدال بعض قضبان اليورانيوم. التي لا يمكن أعادة استخدامها في المفاعل، لكنها تبقى مشعة بمقدار كبير وخطيرة جدًا، لذا يجب أن تخزّن في موقع آمن. وحاليًّا يتم تطوير أساليب دائمة لتخزين هذه المخلفات النووية الإشعاعية الناتجة.

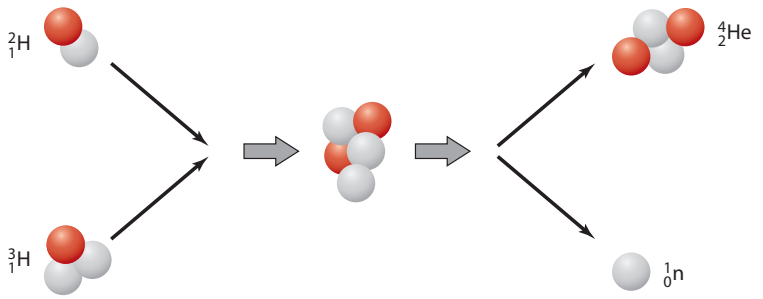


الشكل 8–3 في محطة الطاقة النووية تتحول الطاقة الحرارية المتحررة من التفاعلات النووية إلى طاقة كهربائية.

الاندماج النووي Nuclear Fusion

في عملية **الاندماج النووي** تندمج أنوية خفيفة؛ لتكوين أنوية أثقل وتتحرر طاقة كبيرة نتيجة هذه العملية كما في **الشكل 9–3**. درست سابقًا أن النواة الأثقل تكون طاقة ربطها أكبر، وتكون كتلتها أقل من مجموع كتل النيوكليونات المكونة لها. وهذا النقص في الكتلة يحدد مقدار الطاقة المتحررة.

إن العمليات التي تحدث في الشمس هي مثال على عملية الاندماج النووي؛ ومن أمثلتها تفاعل سلسلة (I) (بروتون – بروتون) حيث تندمج أربع أنوية هيدروجين (بروتونات) خلال عدة مراحل لتكوين نواة ذرة هيليوم واحدة. إن كتلة أربعة بروتونات أكبر من كتلة نواة الهيليوم – 4 الناتجة، وهذه الطاقة المكافئة لفرق الكتلة تظهر على شكل طاقة حركية للجسيمات الناتجة. والطاقة المتحررة نتيجة الاندماج تساوي 25 MeV، وبالمقارنة مع الطاقة المتحررة من تفاعل كيميائي لجزيء واحد من الديناميت والتي تعادل 20 eV، تقريبًا، نجد أنها أقل مليون مرة تقريبًا من طاقة الاندماج النووي.



الشكل 9–3 اندماج الديوتيريوم والتريتيوم لإنتاج الهيليوم. البروتون باللون الأحمر، والنيوترون باللون الرمادي في الشكل.

تندمج نواتي ذرة الهيدروجين $^{1}_{1}H$ لإنتاج نواة نظير الهيدروجين (الديوتريوم) $^{2}_{1}H$

$$^{1}_{1}H + ^{1}_{1}H \longrightarrow ^{2}_{1}H + ^{0}_{+1}e + ^{0}_{0}\nu$$

ثم تندمج نواة ديوتريوم مع نواة هيدروجين لإنتاج نواة نظير الهليوم $^{3}_{2}He$

$$^{1}_{1}H + ^{2}_{1}H \longrightarrow ^{3}_{2}He + \gamma$$

ويحدث التفاعلان السابقان مرتين لإنتاج جسيمين $^{3}_{2}He$ يلزمان لإحداث التفاعل التالي:

$$^{3}_{2}He + ^{3}_{2}He \longrightarrow ^{4}_{2}He + 2\,^{1}_{1}H$$

والنتيجة النهائية هي أن أربعة بروتونات تنتج ذرة $^{4}_{2}He$ واحدة واثنين من البوزيترونات واثنين من النيوترينات وطاقة.

إن قوة التنافر بين النوى المشحونة تحتاج أن تكون طاقة النوى المندمجة عالية جدًّا. لذلك لا تحدث تفاعلات الاندماج، إلا عندما يكون للأنوية كميات هائلة من الطاقة الحرارية. وتحتاج سلسلة بروتون– بروتون إلى درجة حرارة 2×10^{7} K، كتلك التي وجدت في مركز الشمس. وبالكيفية نفسها تحدث تفاعلات الاندماج في القنبلة الهيدروجينية، أو القنبلة النووية الحرارية. فنحصل على درجة الحرارة العالية الضرورية لإحداث التفاعل الاندماجي في هذه القنبلة من انشطار اليورانيوم أو القنبلة النووية.

3–2 مراجعة

24. **انبعاث بيتا** كيف يمكن لإلكترون أن ينبعث من النواة في انبعاث بيتا إذا لم تحتوي النواة على الإلكترونات؟

25. **التفاعلات النووية** يخضع نظير البولونيوم $^{210}_{84}Po$ لانبعاث ألفا. اكتب معادلة التفاعل.

26. **المفاعل النووي** يستخدم الرصاص واقيًا من الإشعاع. لماذا لا يمكن اعتباره خيارًا جيدًا ليكون مهدئًا في المفاعل النووي؟

27. **الاندماج النووي** يحتوي تفاعل اندماجي واحد على نواتي ديوتيريوم $^{2}_{1}H$، ويحتوي جزيء الديوتيريوم على ذرتي ديوتيريوم. لماذا لا يتعرض الجزيئان لعملية الاندماج؟

28. **طاقة** احسب الطاقة المتحررة من التفاعل النووي الاندماجي التالي في الشمس:

$$^{1}_{1}H + ^{1}_{1}H \longrightarrow ^{2}_{1}H + ^{0}_{+1}e + ^{0}_{0}\nu$$

29. **التفكير الناقد** تستخدم بواعث ألفا في كواشف التدخين. فيوضع باعث على أحد ألواح المكثف. وتصطدم جسيمات ألفا باللوح الآخر، ونتيجة لذلك يتولد فرق في الجهد بين اللوحين. فسّر وتنبأ أي اللوحين يكون له جهد موجب أكبر.

عندما درس الفيزيائيون الأوائل النواة بوساطة الجسيمات ذات السرعات العالية، كان عليهم استخدام جسيمات ألفا من مصادر مشعة. وقد استخدم مجربون آخرون الأشعة الكونية التي تنتج عن عمليات لم تفهم بصورة كاملة حتى الآن في النجوم والمجرات. في بداية عام 1930م طُورت أول أجهزة مختبرية استطاعت مسارعة البروتونات، وجسيمات ألفا لتكسبها طاقة كبيرة كافية لاختراق نواة الهدف. وفي الوقت الحاضر يستخدم جهازان لهذا الغرض هما المسارع الخطي والسنكروترون بشكل منتظم.

الفيزياء في حياتك:

مصادم الهدرونات الكبير هو أضخم مُعجِّل جسيمات وأعلاها طاقة وسرعة في العالم، ويصل طوله- في شكل دائري- نحو 72 km على عمق نحو 100 m، ويستخدم هذا المسارع لمصادمة الجسيمات دون ذرية ودراسة نواتج التصادم.

تساؤلات جوهرية:

- كيف تنتج الجسيمات النووية ويكشف عنها؟
- ما هي خصائص النموذج المعياري للمادة؟
- كيف تحدث التحويلات بين الكتلة والطاقة ؟
- ما دور القوة النووية الضعيفة؟

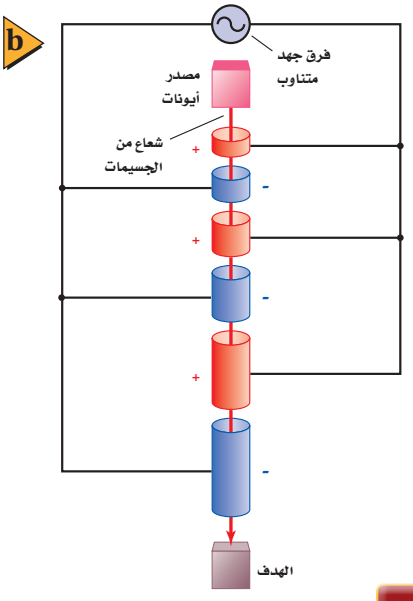
المفردات:

- الكواركات
- النموذج المعياري
- إنتاج الزوج
- الليبتونات
- حاملات القوى
- القوة النووية الضعيفة

المسارعات الخطية Linear Accelerators

يستخدم المسارع الخطي لمسارعة الجسيمات المشحونة مثل البروتونات أو الإلكترونات، ويتكون المسارع من سلسلة من الأنابيب المجوّفة داخل حجرة طويلة مخلخلة الضغط. وهذه الأنابيب موصولة بمصدر جهد متناوب عالي التردد، كما في **الشكل 10–3**. تُنتج البروتونات في مصدر أيوني، وعندما يطبق جهد سالب على الأنبوب الأول فإن البروتونات الداخلة له تتسارع. ونتيجة لعدم وجود مجال كهربائي داخل الأنبوب، فإن البروتونات تتحرك داخله بسرعة منتظمة. ويعدل كل من طول الأنبوب وتردد الجهد؛ بحيث عندما تصل البروتونات إلى النهاية البعيدة له فإن جهد الأنبوب الثاني يصبح سالبًا بالنسبة للأنبوب الأول. فيعمل المجال الكهربائي المتكوّن في الفجوة بين الأنابيب على مسارعة البروتونات إلى داخل الأنبوب الثاني. تستمر هذه العملية بحيث تبقى البروتونات تتسارع بين كل زوج من الأنابيب. تزداد طاقة البروتون بمقدار 10^5 eV بتأثير كل تسارع. وفي نهاية المسارع تكون البروتونات قد اكتسبت طاقة تقدر بعدة ملايين أو بلايين الإلكترون فولت.

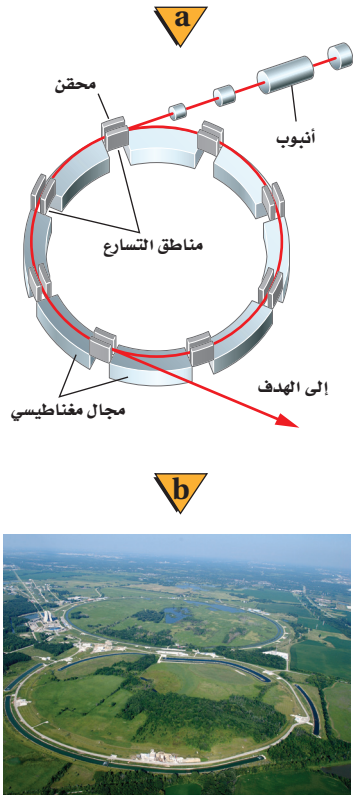
الشكل 10–3 المسارع الخطي في جامعة ستنافورد طوله 3.3 km ويعمل على مسارعة الجسيمات المشحونة إلى طاقات 20 GeV (**a**). تتسارع بروتونات في مسارع خطي عن طريق تغيير الشحنة في الأنابيب في أثناء حركة البروتونات (**b**).



السنكروترون The Synchrotron

يمكن أن يصنع المسارع ليكون أصغر باستخدام المجال المغناطيسي؛ لجعل مسار الجسيمات دائريًّا. في جهاز السنكروترون يوجد حقل مغناطيسي لتحريك الجسيمات حركة دائرية، وحقل كهربائي لتسريع الجسيمات المشحونة، كما في **الشكل 3–11a**.

إن شدة المجال المغناطيسي وطول المسار يتم اختيارهما؛ بحيث تصل الجسيمات إلى موقع المجال الكهربائي المتناوب بالضبط، عندما تعمل قطبية المجال على تسارعها. إن إحدى أجهزة السنكروترون الضخمة التي تعمل الآن موجودة في مختبر مسارع فيرمي الوطني بالقرب من شيكاجو الموضح في **الشكل 3–11b**، حيث تصل طاقة البروتونات فيه إلى 1 TeV (10^{12} eV) . ينتقل شعاع البروتون، وشعاع ضديد البروتون في اتجاهات متعاكسة في المسار الدائري (ضديد البروتون جسيم له كتلة البروتون نفسها لكن شحنة معاكسة) فتتصادم الأشعة في مناطق تفاعلات متعددة، وتدرس النتائج.

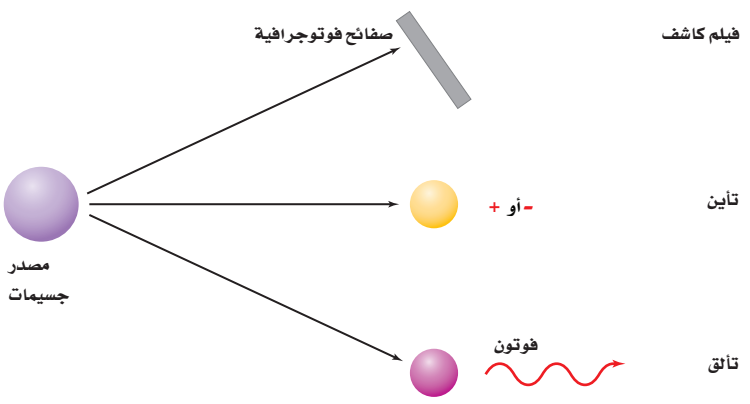


الشكل 3–11 السنكروترون عبارة عن مسارع دائري، تستخدم فيه المغانط لضبط المسار ومجالات كهربائية لتسارع الجسيمات (**a**).سنكروترون مختبر فيرمي نصف قطره 2 km (**b**).

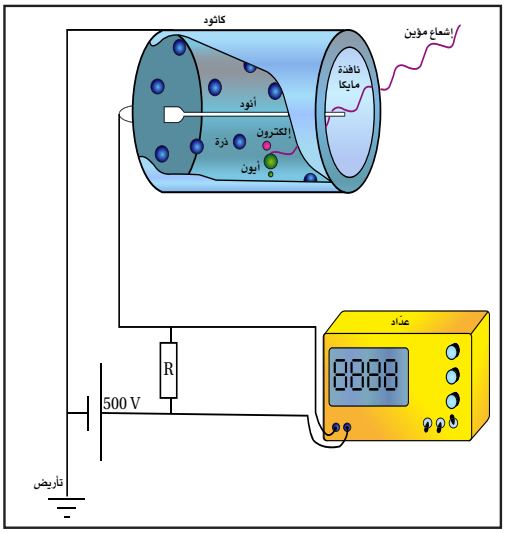
كواشف الجسيمات Paricle Detectors

ابتكر العلماء خلال القرن الماضي أدوات لكشف وتمييز نواتج التفاعلات النووية بحيث نستطيع الإحساس بها بحواسنا الإنسانية المحدودة نسبيًّا. فيدك توقف جسيم ألفا، رغم عدم إحساسك بأن الجسيم قد ارتطم بك. وفي اللحظة التي تقرأ فيها هذه العبارة، تعبر جسمك بلايين النيوترونات الشمسية دون أن تشعر بها.

درست أن عينات اليورانيوم كوّنت طبقة ضبابية على الصفائح الفوتوجرافية؛ فعندما اصطدمت جسيمات ألفا أو جسيمات بيتا أو أشعة جاما بالصفيحة الفوتوجرافية أصبح لون الصفيحة ضبابيًّا. لذلك يمكن استخدام تلك الصفائح للكشف عن الإشعاع. وتستخدم أجهزة أخرى عديدة للكشف عن الجسيمات المشحونة وأشعة جاما. ومعظم هذه الأجهزة تعمل على مبدأ الاستفادة من حقيقة أن تصادم الذرات مع جسيمات ذات سرعة عالية تعمل على تحرير إلكترونات من الذرات، أي أن الجسيمات العالية السرعة تؤين المادة التي تُقذف إليها. بالإضافة إلى ذلك تتألق (تلمع) بعض المواد، أو تبعث فوتونات، عند تعرضها لأنواع معينة من الإشعاع. وهكذا فإن المواد الفلّورية يمكن أن تستخدم أيضًا للكشف عن الإشعاع. وهذه الطرائق الثلاث للكشف عن الإشعاع موضحة في **الشكل 3–12**.



الشكل 3–12 يمكن الكشف عن الجسيمات عندما تتفاعل مع المادة عن طريق التعرض لفيلم كاشف، أو شحن المادة، أو التسبب بانبعاث فوتونات من المادة.



الشكل 13–3 يبين تركيب أنبوب عداد جايجر

عدّاد جايجر يحتوي أنبوب عدّاد جايجر- مولر الموضح في **الشكل 13–3** على أسطوانة نحاسية ذات شحنة سالبة. يوضع في محورها قطب معدني موجب الشحنة، بحيث يبقى فرق الجهد المطبق على القطب والأسطوانة دون النقطة التي يحدث عندها التفريغ التلقائي للشحنات أو الومضة. عندما يدخل جسيم مشحون أو أشعة جاما إلى الأنبوب يؤيِّن ذرة غاز بين أسطوانة النحاس والقطب، فيتسارع الأيون الموجب الناتج في اتجاه أسطوانة النحاس، تحت تأثير فرق الجهد، ويتسارع إلكترون في اتجاه القطب الموجب. وحركة الجسيمات المشحونة في اتجاه الأقطاب تولِّد سيلاً من الجسيمات المشحونة، فتتحرك نبضة التيار خلال الأنبوب.

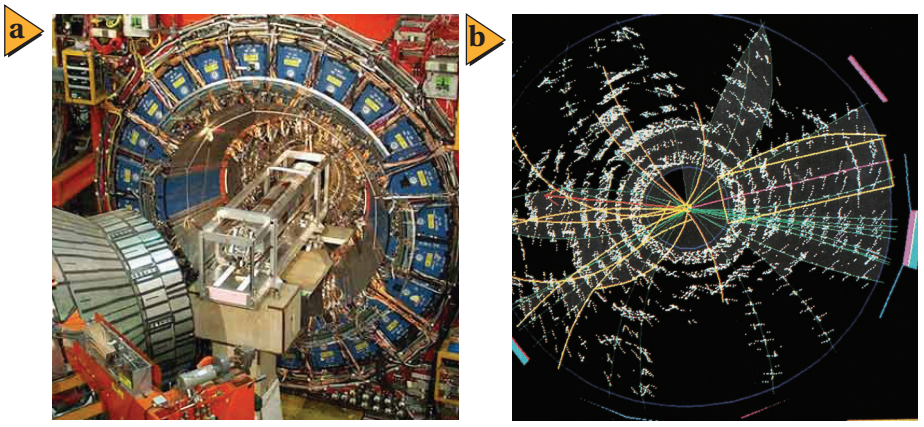
مسارات التكاثف أول جهاز استخدم للكشف عن الجسيمات كان حجرة غيمة ولسون. تحتوي هذه الحجرة على منطقة مشبعة ببخار الماء أو بخار الإيثانول. وعندما تنتقل الجسيمات المشحونة خلال الحجرة تترك أثرًا من الأيونات في مسارها، فيتكاثف البخار على شكل قطرات صغيرة على تلك الأيونات. وبهذه الطريقة تتكون مسارات مرئية من القطرات، أو الضباب.

الشكل 14–3 تُظهر صورة حجرة فقاعة اللون الوهمية مسار الجسيمات المشحونة.

حجرة الفقاعة وفي الكشاف المماثل الذي لا يزال يستخدم حتى الآن، والمسمى بحجرة الفقاعة، تعبر الجسيمات المشحونة خلال سائل تبقى درجة حرارته فوق درجة الغليان. في هذه الحالة، فإن مسار الأيونات يسبب تكوُّن فقاعات بخار تحدد مسارات الجسيمات، كما في **الشكل 14–3**.

أنتجت التقنية الحديثة حجرات كشف تسمى حجرات سلكية تشبه أنابيب جايجر–مولر العملاقة. وتفصل الصفائح الكبيرة بوساطة فجوة صغيرة مملوءة بغاز ذي ضغط منخفض. يحدث التفريغ الكهربائي في مسار الجسيم الذي يعبر خلال الحجرة، فيكشف الحاسوب عن التفريغ ويسجّل موقعه للتحليل التالي.

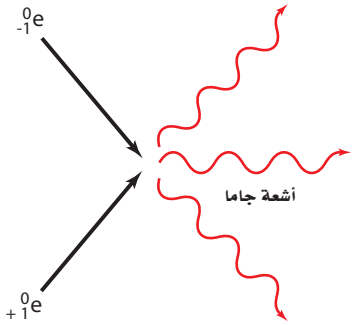
الجسيمات المتعادلة كهربائيًّا لا تغادر المسارات؛ لأنها لا تُحدث تفريغًا. ويمكن استخدام قوانين حفظ الطاقة، وحفظ الزخم في التصادمات، لتبين ما إذا أنتجت جسيمات متعادلة. وتستخدم كواشف أخرى لتقيس طاقة الجسيمات. تستخدم مجموعة متكاملة من أجهزة الكشف في تجارب المسارعات العالية الطاقة، ومنها الكاشف التصادمي في مختبر فيرمي؛ حيث يمكنه القيام بثلاث مهام، كما هو موضح في **الشكل 15a–3**. صمم الكاشف التصادمي في مختبر فيرمي لرصد ربع مليون تصادم للجسيم في الثانية. يعمل الكاشف كآلة تصوير كتلتها 5000-طن، لتكوين صورة حاسوبية لحالات التصادم كما في **الشكل 15b–3**.



الشكل 15–3 في مختبر فيرمي، يسجّل الكاشف التصادمي المسارات الناتجة عن بلايين التصادمات (a). صورة حاسوبية للكاشف التصادمي في مختبر فيرمي لحالة الكوارك العلوي موضحة في الشكل (b)

ضديد المادة Antimatter

بداية عام 1920م توقع باولي ديراك وجود ضديد جسيم خاص بكل نوع من الجسيمات. والإلكترون الموجب الذي يسمى بوزترون مثال على ضديد الجسيم، للإلكترون وللبوزترون مقدار الكتلة والشحنة نفساهما، ولكن إشارتَيْ شحنتيهما متعاكستان. وعندما يصطدم إلكترون، وبوزترون معًا فإن كلًّا منهما يُفني الآخر، وينتج عن ذلك طاقة على شكل أشعة جاما. كما هو موضح في **الشكل 16–3**.



■ **الشكل 16–3** نتائج تصادم البوزترون والإلكترون في عملية إنتاج أشعة جاما

الجسيمات Particles

إن نموذج الذرة الذي اكتشف عام 1930م كان بسيطًا للغاية؛ فالذرة فيه مكونة من بروتونات ونيوترونات محاطة بالإلكترونات. ثم عملت الدراسات العميقة للاضمحلال الإشعاعي على تشويش هذه الصورة المبسطة. فبينما لجسيمات ألفا وأشعة جاما التي تنبعث من النواة المشعة طاقات أحادية تعتمد على النواة المضمحلة، فإن جسيمات بيتا تنبعث بمدى واسع من الطاقات. قد يظن البعض أن طاقة جسيمات بيتا قد تساوي الفرق بين طاقة النواة قبل الاضمحلال وطاقة النواة الناتجة عن الاضمحلال. والحقيقة أن المدى الواسع لطاقات الإلكترونات المنبعثة خلال انبعاث بيتا نبهت العالم نيلز بور إلى وجود جسيم آخر يمكن أن يشارك في التفاعل النووي، ويحمل جزءًا من الطاقة. توقع العالمان باولي عام 1931م وفيرمي عام 1934م وجود جسيم متعادل غير مرئي ينبعث مع جسيم بيتا أطلق عليه فيرمي اسم النيوترينو، ويعني في الإيطالية "جسيم صغير متعادل". ولكن في الواقع فإن هذا الجسيم هو الأنتي نيوترينو ولم يلاحظ مباشرة حتى عام 1956م. أظهرت دراسات أخرى وجود جسيمات أخرى، منها الميون الذي يبدو كإلكترون ثقيل، وقد اكتشف عام 1937م. وفي عام 1935م افترض يوكاوا وجود جسيم جديد يستطيع حمل القوة النووية خلال الفراغ، تمامًا كما يحمل الفوتون القوة الكهرومغناطيسية. وفي عام 1947م اكتشف الجسيم المفترض وهو بيون. وعلى الرغم أنه لم يكن يحمل القوة النووية القوية، لكنه كان نوعًا جديدًا من المادة.

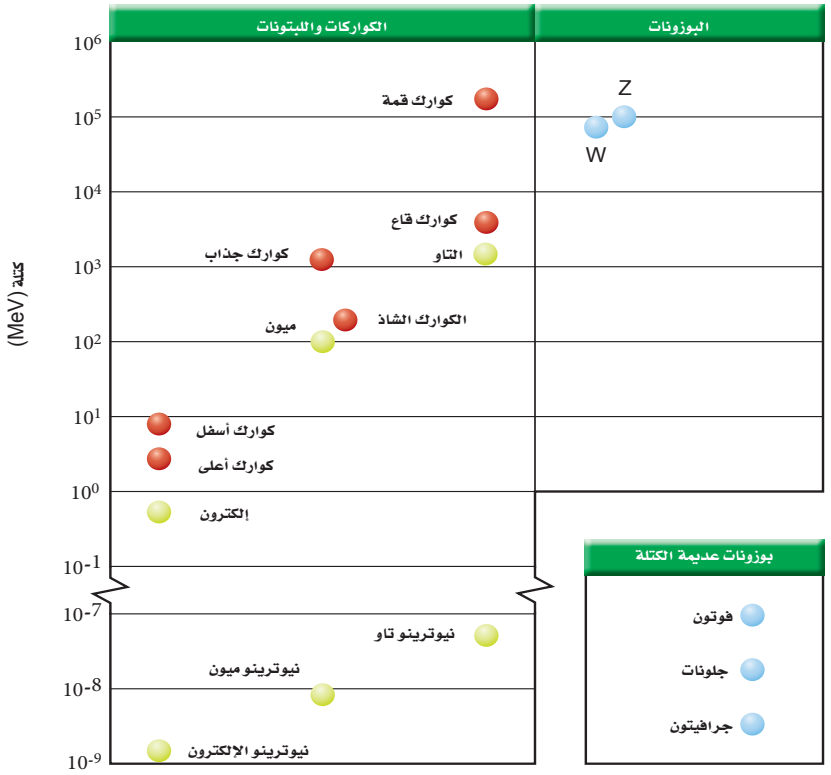
التجربة العملية:

ما العلاقة بين المسافة من مصدر إشعاع جاما وبيتا وشدة الإشعاع؟

لقد نتج عن التجارب التي أجريت في مسارعات الجسيمات معرفة المزيد عن جسيمات أخرى جديدة، بعضها ذو كتلة متوسطة وبعضها الآخر ذو كتلة أكبر من كتلة البروتون. وتحمل شحنات موجبة أو سالبة أو لا تحمل شحنة، وبعضها له فترة حياة 10^{-23}s، ولبعضها الآخر فترة حياة غير محددة. من جهة أخرى سئل العالم فيرمي أن يحدد مسار جسيم ما عند نقطة معينة، فأجاب "إذا استطعت أن أتذكر أسماء جميع هذه الجسيمات فعندئذٍ سأكون عالم نبات".

النموذج المعياري The Standard Model

لقد أصبح واضحًا في أواخر عام 1960م أن البروتونات والنيوترونات والبيونات ليست جسيمات أولية؛ بل مكوّنة من مجموعة من الجسيمات لا توجد بشكل منفصل وتسمى **الكواركات**، كما في **الشكل 17–3**. وتنتمي الإلكترونات والنيوترينات إلى عائلة مختلفة تسمى **لبتونات**. ويعزى الفرق الجوهري بين هذين النوعين (**الكواركات ، واللبتونات**) إلى وجود ونسبة الشحنة التي يحملها الجسيم. ويعتقد العلماء الآن وجود ثلاث عائلات من الجسيمات الأولية: الكواركات، واللبتونات و**حاملات القوة** (البوزونات)، وهذا النموذج من مكوّنات بناء المادة، يسمى **النموذج المعياري**. وتسمى الجسيمات مثل البروتونات والنيوترونات التي تتكون من ثلاثة كواركات الباريونات.

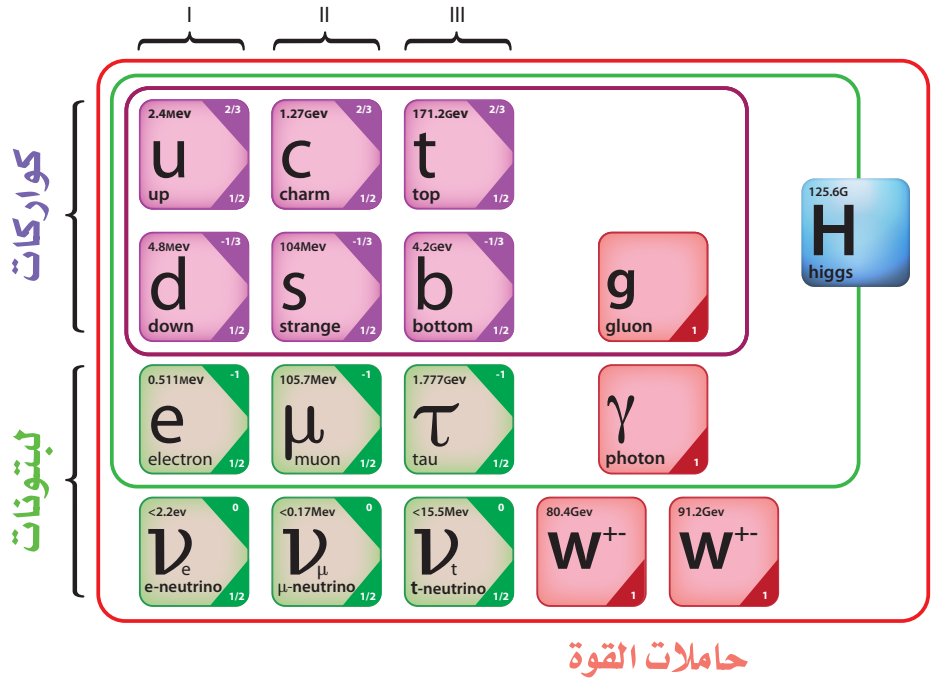


■ **الشكل 17–3** تقسم الكواركات واللبتونات المعروفة إلى ثلاث أجيال. يتكوّن عالم اليوم من جسيمات من الجيل الأول (u، d، e). والجسيمات من الجيل الثاني (c،s،μ) موجودة في الأشعة الكونية، وتنتج بطريقة روتينية في مسارعات الجسيم. ويعتقد أن جسيمات الجيل الثالث (t،b،τ) مستثارة قليلاً خلال اللحظات المبكرة للانفجار العظيم، وتوجد نتيجة التصادمات العالية الطاقة. تحمل البوزونات القوى الكهرومغناطيسية والقوة النووية الضعيفة والقوية وقوى الجاذبية، ويعبّر عن الكتل بمكافئات الطاقة المعطاة بمعادلة أينشتاين $E = mc^2$

والزوج المكوّن من الكوارك وضديد الكوارك، مثل البيون يسمى ميزونًا أيضًا. وهناك نوع جديد من الجسيمات يتكوّن من أربعة كواركات، وضديد كوارك واحد، يسمى بنتاكوارك، ومن المحتمل أن يكون قد شوهد مؤخرًا. وهناك جسيمات تتكون من ستة كواركات وستة لبتونات. والكواركات واللبتونات تشكل المادة، بينما حاملات القوة جسيمات تنقل القوى؛ فمثلاً تحمل الفوتونات القوة الكهرومغناطيسية، وتحمل الجلونات الثمانية القوى النووية القوية التي تربط الكواركات في الباريونات والميزونات. أما جلونات البوزونات الثلاثة الضعيفة فهي متضمنة في إشعاع بيتا.

الجرافيتون، اسم يطلق على حامل قوة الجاذبية الذي لم يكتشف حتى الآن. وقد تم تلخيص خصائص الجسيمات الأولية التي تمثل أساس النموذج المعياري في **الشكلين 18–3، 19–3**.

■ **الشكل 18–3** الأجيال الثلاثة للمادة.



البروتونات والنيوترونات Protons and Neutrons

نموذج الكوارك يصف النيوكليونات (البروتونات والنيوترونات) بوصفها تجمعًا من الكواركات. وكل نيوكليون مكوّن من ثلاثة كواركات، فيتكون البروتون من اثنين من كوارك أعلى u (شحنة $+\frac{2}{3}e$) وكوارك أسفل واحد d (شحنة $-\frac{1}{3}e$)، ويعبر عن البروتون بالرمز $p = uud$؛ فشحنة البروتون عبارة عن مجموع شحنة ثلاثة كواركات: لاحظ **الشكل 19–3**

$$[\frac{2}{3}+\frac{2}{3}+(-\frac{1}{3})]\,e=+e$$

بينما يتكون النيوترون من كوارك أعلى واحد واثنين من كوارك أسفل ويعبر عن النيوترون بالرمز $n = udd$؛ فشحنة النيوترون صفر:

$$[\frac{2}{3}+(-\frac{1}{3})+(-\frac{1}{3})]\,e=0$$

لا يمكن مشاهدة الكواركات الحرة المنفردة؛ لأن القوة القوية التي تبقيها مجتمعة معًا تصبح أكبر كلما اندفعت الكوراكات مبتعدة بعضها عن بعض. في مثل هذه الحالة، تعمل القوة القوية كقوة النابض، فهي لا تشبه القوة الكهربائية التي تصبح أضعف كلما تحركت الجسيمات مبتعدًا بعضها عن بعض. وتنتقل القوة القوية في نموذج الكوارك بوساطة الجلونات.

التحولات بين الكتلة والطاقة
Conversions Between Mass and Energy

يمكن حساب كمية الطاقة التي تتولّد نتيجة فناء جسيم باستخدام معادلة أينشتاين لتكافؤ الطاقة والكتلة $E = mc^2$. إن كتلة الإلكترون 9.11×10^{-31} kg وتساوي كتلة البوزترون؛ لذلك فإن الطاقة المكافئة للبوزترون والإلكترون معًا يمكن حسابها كما يلي:

$$E = 2\,(9.11 \times 10^{-31}\ \text{kg})(3.00 \times 10^{8}\ \text{m/s})^2$$

$$E = (1.64 \times 10^{-13}\ \text{J})\ (1\ \text{eV}/1.60 \times 10^{-19}\ \text{J})$$

$$E = 1.02 \times 10^{6}\ \text{eV أو } 1.02\ \text{MeV}$$

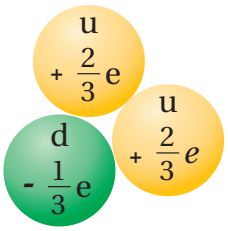
عندما يكون كل من البوزترون والإلكترون في حالة سكون، فإن كلًّا منهما يفنى الآخر. ومجموع طاقات أشعة جاما المنبعثة هو 1.02 MeV، ويمكن أن يحدث أيضًا معكوس الفناء، أي أن الطاقة يمكن أن تتحول مباشرةً إلى مادة. فإذا عبر شعاع جاما بطاقة 1.02 MeV على الأقل بالقرب من نواة فقد ينتج زوج من البوزترون والإلكترون.

$$\gamma \rightarrow e^- + e^+$$

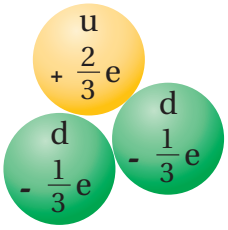
يسمى تحوّل الطاقة إلى مادة وضديدها **إنتاجَ الزوج**. ولا يمكن أن تحدث التفاعلات منفردة، مثل تفاعل $\gamma \rightarrow e^-$ و $\gamma \rightarrow e^+$؛ لأن مثل هذه التفاعلات لا تحقق قانون حفظ الشحنة. وكذلك تفاعل $\gamma \rightarrow e^- + {}^1_1p$ لا يحدث أيضًا؛ فالزوج يجب أن يكون الجسيم وضديد الجسيم الخاص به.

جسيمات المادة وضديد المادة تتواجد كأزواج إنتاج زوج بوزترون - إلكترون موضح في **الشكل 20–3**. حيث يعمل المجال المغناطيسي حول حجرة الفقاعة على ثني مسارات البوزترون والإلكترون؛ لتتحرك في اتجاهات متعاكسة. بينما لا يكون لأشعة جاما أي مسار. وإذا كانت طاقة أشعة جاما أكبر من 1.02 MeV، فإن الفائض في الطاقة يظهر على شكل طاقة

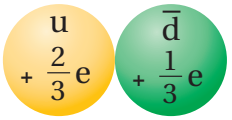
الشكل 19–3 بالرغم من أن للكواركات شحنات جزئية ($\frac{1}{3}$ ، $\frac{2}{3}$) شحنة الإلكترون فإن جميع الجسيمات التي تكوّنها يكون لها عدد صحيح من الشحنات.



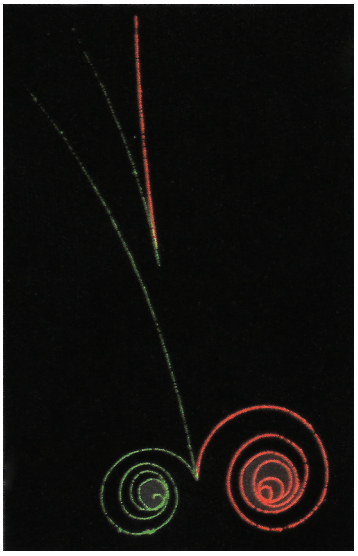
بروتون



نيوترون



بيون



الشكل 20–3 عندما ينتج الجسيم فإن ضديد هذا الجسيم ينتج أيضًا. هنا تضمحل أشعة جاما إلى زوج من الإلكترون والبوزترون.

مسائل تدريبية

30. كتلة البروتون 1.67×10^{-27} kg ، أجب عما يلي:

a. أوجد الطاقة المكافئة لكتلة البروتون بوحدة الجول. **b.** حوّل هذه القيمة إلى وحدة eV.

c. أوجد الطاقة الكلية الصغرى لأشعة جاما التي يمكن أن تؤدي إلى تكون زوج من البروتون وضديد البروتون.

31. يمكن لكل من البوزترون والإلكترون أن يفني أحدهما الآخر، وينتج ثلاثة إشعاعات جاما. تم الكشف عن اثنين من إشعاعات جاما، فكانت طاقة أحدها 225 keV وطاقة الآخر 357 keV، ما طاقة إشعاع جاما الثالث؟

32. كتلة النيوترون 1.008665 u، أوجد الطاقة:

a. المكافئة لكتلة النيوترون بوحدة MeV.

b. الكلية الصغرى لأشعة جاما التي يمكن أن تؤدي إلى تكون زوج من النيوترون وأنتي نيوترون.

33. كتلة الميون 0.1135 u ، وهو يضمحل إلى إلكترون وزوج نيوترينو. ما مقدار الطاقة الناتجة عن هذا الاضمحلال؟

حركية للبوزترون والإلكترون، فيتصادم البوزترون في الحال مع إلكترون آخر، ويفني كل منهما الآخر، وينتج إشعاعان أو ثلاثة إشعاعات جاما، طاقتها الكلية لا تقل عن 1.02 MeV

حفظ الجسيم: كل كوارك وكل لبتون أيضًا له ضديد جسيم. يتماثل ضديد الجسيمات مع الجسيمات ما عدا شحنتيهما؛ حيث تكون شحنة ضديد الجسيم معاكسة. فالكوارك الأعلى u مثلاً شحنته $+\frac{2}{3}$ e، بينما ضديد الكوراك الأعلى $\bar{u}$ شحنته $-\frac{2}{3}$ e، وشحنة البروتون uud تساوي $+1$ وشحنة ضديد البروتون $\bar{u}\,\bar{u}\,\bar{d}$ تساوي -1 وعندما يصطدم الجسيم وضديده فإن كلًّا منهما يفنى الآخر، ويتحولان إلى فوتونات، أو إلى زوج من جسيم وضديد جسيم أخف وإلى طاقة. ولأن العدد الكلي للكواركات واللبتونات في الكون ثابت؛ فإن الكواركات واللبتونات توجد أو تفنى فقط بوصفهما زوج جسيم وضديد الجسيم. ومن جهة أخرى فإن حاملات القوة ومنها الجرافيتونات والفوتونات والجلونات، والبوزونات الضعيفة، قد توجد أو تفنى إذا كان هناك طاقة كافية.

ولأن كتلة البروتون أكبر 1836 مرة من كتلة الإلكترون، فإن الطاقة اللازمة لتكوين زوج من البروتون وضديد البروتون كبيرة نسبيًّا. وقد تم إنتاج وملاحظة زوج البروتون وضديد البروتون أول مرة في باركلي، في كاليفورنيا عام 1955م.

مسألة تحدٍّ

يضمحل $^{238}_{92}U$ بانبعاث ألفا وبانبعاثين متتاليين لجسيم بيتا ويتحول ثانية إلى نظير لليورانيوم.

1. وضحّ معادلات الاضمحلال النووي الثلاثة.

2. احسب العدد الكتلي لليورانيوم المتكوّن.

باعثات بيتا والتفاعل الضعيف
Beta Decay and the weak interaction

لا توجد الإلكترونات العالية الطاقة المنبعثة من اضمحلال جسيمات في أنوية ذرات مشعة داخل النواة. فمن أين جاءت هذه الإلكترونات إذًا؟ في عملية اضمحلال النيوترون يتحول النيوترون إلى بروتون، في حين أن النيوترون داخل النواة المستقرة لا يضمحل. فإن النيوترون الحر أو الموجود في النواة غير المستقرة هو الذي يمكن أن يضمحل إلى بروتون، ويرافقه انبعاث جسيم بيتا. ويشارك الأنتي نيوترينو في الطاقة الناتجة مع البروتون وجسيم بيتا. والأنتي نيوترينو جسيم كتلته صغيرة جدًّا، وهو عديم الشحنة، ولكنه كالفوتون؛ له زخم وطاقة. وتكتب معادلة اضمحلال النيوترون كما يلي:

$$^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e + {}^{0}_{0}\bar{\nu}$$

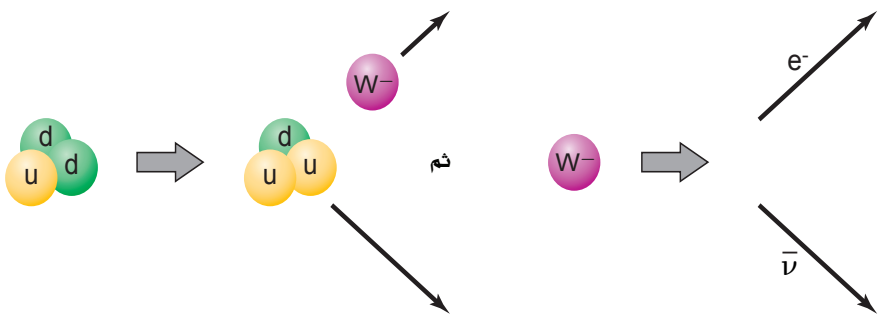
وعندما يضمحل النظير بإطلاق بوزترون تحدث عملية شبيهة بانبعاث بيتا. وعلى الرغم من أنه لم يلاحظ اضمحلال البروتون الحر، فإنه يمكن للبروتون داخل النواة أن يتحول إلى نيوترون مع إطلاق بوزترون $^{0}_{+1}e$ ونيوترينو $^{0}_{0}\nu$ كما يلي:

$$^{1}_{1}P \longrightarrow {}^{1}_{o}n + {}^{0}_{+1}e + {}^{0}_{0}\nu$$

إن اضمحلال النيوترونات إلى بروتونات، واضمحلال البروتونات إلى نيوترونات، لا يمكن تفسيره بوساطة القوة النووية القوية.

إن وجود باعثات بيتا يشير إلى أنه يجب أن يكون هناك تفاعل آخر، وهو أن **القوة النووية الضعيفة** تؤثر في النواة. وهذه القوة أضعف كثيرًا من القوة النووية القوية.

نموذج الكوارك لانبعاث بيتا إن الفرق بين البروتون uud، والنيوترون udd كوارك واحد فقط، حيث يحدث انبعاث بيتا في نموذج الكوارك على مرحلتين، كما يتضح من **الشكل 21–3**. أولاً: كوارك d واحد في النيوترون يتحول إلى كوارك u مع انبعاث بوزون W^-؛ حيث W^- أحد حاملات القوة الضعيفة الثلاث. وفي الخطوة الثانية يتحول البوزون إلى إلكترون وضديد النيوترينو، وبالمثل في تحلل البروتون في النواة ينبعث نيوترون وبوزون W^+، ومن ثم ينحل البوزون W^+ إلى بوزوترن ونيوترينو.



الشكل 21–3 يبين انبعاث بيتا عند تحول نيوترون إلى بروتون بوساطة نموذج الكوارك:
$d \rightarrow u + W^-$ ثم $W^- \longrightarrow e^- + \bar{\nu}$

إن انبعاث حامل القوة الضعيفة الثالث، بوزون Z°، لا يترافق مع تحوّل من كوارك إلى آخر. يُحدث البوزون Z° تفاعلاً بين النيوكليونات والإلكترونات في الذرات المماثلة، ولكنه أضعف كثيرًا من القوة الكهرومغناطيسية التي تحافظ على الذرة متماسكة؛ حيث تم الكشف عن هذا التفاعل أول مرة عام 1979م. وتمت ملاحظة البوزونات W^+ وW^- وZ° بصورة مباشرة أول مرة عام 1983م.

الشكل 22–3 في النجم فوق المستعر، فإن القوى الكهرومغناطيسية والقوى الضعيفة ليست متمايزة. والضوء المتزايد والنيوترينات الصادرة من النجم فوق المستعر 1987A والموضحة هنا تصل الأرض في اللحظة نفسها، وهذا يظهر أن النيوترينات تنتقل بسرعة قريبة من سرعة الضوء وتنتج في النجم الأعظم. وكما هو متوقع، ظهر النجم فوق المستعر قبل الانفجار (**a**) خلال الانفجار (**b**) وبالقرب من هابل (**c**).

لقد ساد الاعتقاد طويلاً أن كلًّا من النيوترينات وضديد النيوترينات عديمة الكتلة، إلا أن التجارب الأخيرة التي التقطت النيوترينات المنبعثة من الشمس ومن المسارعات الطويلة أظهرت أن للنيوترينات كتلة. على الرغم من أن هذه الكتل أقل كثيرًا من كتلة أي جسيم معروف.

اختبار النموذج المعياري Testing the Standard Model

تستطيع أن تلاحظ من **الشكلين 17–3، 18–3** أن الكواركات واللبتونات تنفصل إلى ثلاثة أجيال. فالعالم المحيط بنا يتكوّن من جسيمات الجيل الأول وهي الجسيمات الأخف وزنًا والأكثر استقرارًا وجسيمات الجيل الثاني وجسيمات الجيل الثالث وهي الأثقل وزنًا والأقل استقرارًا. ما الذي يحدد كتل الكواركات واللبتونات؟ تصوّر هيغز أن مجالاً يسمى مجال هيغز ينشأ عن وجود جسيمات هيغز، وأن الجسيمات تجد مقاومة تحت تأثير هذا المجال الذي يعمل على ظهور ما نسميه كتلة الجسيم، فالإلكترون مثلاً يلاقي مقاومة صغيرة فيكون له كتلة صغيرة، أما البروتون فيلاقي مقاومة كبيرة فتكون له كتلة كبيرة.

لماذا توجد أربعة قوى؟ إن الاختلافات بين القوى الرئيسية الأربعة واضحة؛ فقد تؤثر القوى بشكل مختلف في الشحنة أو الكتلة، وقد يكون لها تأثيرات مختلفة تبعاً للمسافات، وحاملات القوى لها خصائص مختلفة، وهناك بعض التماثل بين التفاعلات؛ فمثلاً القوى بين الجسيمات المشحونة والقوى الكهرومغناطيسية تُحمل بوساطة الفوتونات، كما تحمل البوزونات W وZ القوى النووية الضعيفة في التفاعلات النووية.

والقوى الكهربائية تؤثر في مدى واسع؛ لأن كتلة الفوتونات صفراً، بينما القوى النووية الضعيفة تؤثر في مسافات قصيرة؛ لأن كتل البوزونات W وZ كبيرة نسبيًّا. تشير النظريات الفلكية الفيزيائية للنجم فوق المستعر إلى حدوث تفاعلين متماثلين خلال الانفجارات النجمية الهائلة، كتلك الموضحة في **الشكل 22–3**. أما النظريات الحالية المتعلقة بأصل الكون فتتوقع أن القوتين كانتا متماثلتين خلال اللحظات المبكرة للكون. لهذا السبب، كانت القوى الكهرومغناطيسية والقوى الضعيفة متحدتين في قوة واحدة تسمى قوة كهربائية ضعيفة، وقد تم تلخيص خواص القوى الرئيسة الأربعة في **الجدول 3–3**.

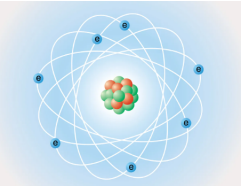
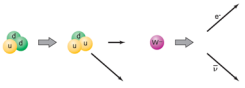
بالطريقة نفسها تبين خلال عام 1970م أن القوى الكهرومغناطيسية والقوة الضعيفة متحدتان بوصفها قوة كهربائية ضعيفة. كذلك توصل الفيزيائيون الآن إلى تطوير نظريات تتضمن القوة القوية أيضًا، ولا يزال العمل غير مكتمل. وما زالت النظريات تتطور، ونظرية الاتحاد التام التي تتضمن التجاذب تحتاج إلى المزيد من العمل.

وقد ظهر ارتباك كبير نتيجة الدراسات التي أجريت على المجرات التي تتوقع أن المادة التي تم وصفها بالنموذج المعياري، تكوّن فقط جزءًا صغيرًا من كتلة الكون. والجزء الأكبر من المادة شكلت المادة المعتمة؛ والتي سميت كذلك لأنها لا تتفاعل مع الفوتونات أو المادة العادية، ماعدا قوة التجاذب. بالإضافة إلى ذلك، فإنها تبدو كطاقة معتمة، وقوة غير معروفة تعمل على تسارع تمدد الكون.

لذلك، فإن الدراسات المتعلقة بالجسيمات المتناهية في الصغر التي تكوّن الأنوية تتصل مباشرة مع البحوث المتعلقة بالأنظمة الكبيرة والمجرات التي تكوّن الكون. وقد اعتاد فيزيائيو الجسيمات الأولية، وعلماء الكون أن يكونوا في النهايتين المتعاكستين لمقياس الطول. والآن يتساءلون معًا: "ما وحدات البناء الأساسية التي يتكون منها العالم؟". قد يستطيعون الإجابة عن هذا السؤال في المستقبل.

الجدول 3–3

القوى الرئيسة الأربعة: الجاذبية، الكهرومغناطيسية، الضعيفة، القوية.

قوة الجاذبية	القوة الكهرومغناطيسية	القوة النووية الضعيفة	القوة النووية القوية
• تؤثر على الجسيمات ذات الكتلة. • حاملات القوة: الجرافيتون (لم يتم اكتشافه بعد). • مدى تأثيرها: لانهائي. • القوة النسبية. 10^{-36} • دائما قوة جذب. • تربط أيضًا الأجسام الكبيرة معًا مثل الكواكب والمجرات. 	• تؤثر في الجسيمات المشحونة كهربائيًا. • حاملات القوة: الفوتونات. • مدى تأثيرها: لانهائي. • القوة النسبية 1. • يمكن أن تكون قوة جذب أو تنافر. • تربط الذرات والجزيئات معًا 	• تؤثر على الكواركات والليبتونات. • حاملات القوة: البوزونات W+ و W- و Zo. • مدى تأثيرها: 10^{-18} m. • القوة النسبية 10^{-7} . • مسؤولة عن اضمحلال بيتا. 	• تؤثر على الكواركات والهدرونات. • حاملات القوة: الجلونات. • مدى تأثيرها 10^{-15} m. • القوة النسبية 20. • تربط الكواركات في الهدرونات، وتحافظ على تماسك النواة. $^{238}_{92}U$

3–3 مراجعة

34. **قذف النواة** لماذا يحتاج البروتون إلى طاقة أكثر من النيوترون عندما يستخدم لقذف النواة؟

35. **مسارع الجسيمات** تتحرك البروتونات في مسارع مختبر فيرمي **الشكل 11–3** في اتجاه حركة عقارب الساعة. ما اتجاه المجال المغناطيسي في مغانط الانحراف؟

36. **إنتاج الزوج** يوضح **الشكل 20–3** إنتاج أزواج الإلكترون–البوزترون. لماذا تنحني مجموعة المسارات السفلية أقل من انحناء زوج المسارات العلوية؟

37. **النموذج المعياري** ابحث في محددات النموذج المعياري والبدائل المحتملة.

38. **التفكير الناقد** تأمل المعادلات التالية.

$$u \rightarrow d + W^+ \quad \text{و} \quad W^+ \rightarrow e^+ + \nu$$

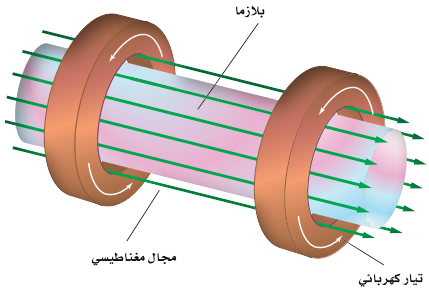
كيف يمكن استخدامها لتفسير الاضمحلال الإشعاعي للنيوكليون الذي ينتج عن انبعاث البوزترون والنيوترينو؟ اكتب المعادلة التي تتضمن نيوكليونات بدلاً من الكواركات.

الاندماج النووي الحراري Thermonuclear Fusion

لعدة عقود مضت بحث الفيزيائيون في إيجاد ودعم تفاعل الاندماج الذي يولّد طاقة أكبر من تلك الطاقة التي يستهلكها. يولّد المفاعل النووي الحراري حرارة هائلة جدًّا من كميات صغيرة من الديوتيريوم $^{2}_{1}H$ ، والتريتيوم $^{3}_{1}H$ ، والذي يمكن استخلاصه من مياه البحر.

لبدء تفاعل الاندماج، يجب أن يسخن خليط من الديوتيريوم والتريتيوم ويضغط تحت ظروف معيارية مشابهة لتلك الموجودة في الشمس. وسوف تحطم الحرارة المتوافرة محتويات العبوات المستخدمة في محطات الانشطار النووي. ويعدّ احتجاز البلازما من مشكلات التصميم الرئيسة للمفاعلات الاندماجية.

العزل المغناطيسي في مفاعلات العزل المغناطيسي، يعبر تيار قوي خلال وعاء يحوي غازي الديوتيريوم والتريتيوم، فتنضغط البلازما داخل الجزء الدائري. وتحدد المجالات المغناطيسية الإضافية شكل سيل البلازما لتعزله بعيدًا عن جوانب الوعاء، كما في الشكل. يحافظ أحد التركيبات الإلكترونية الفضلى على بقاء البلازما على شكل حلقي، مما يعطي فائدة عظيمة بعدم وجود نهايات تتطلب أن تختم.

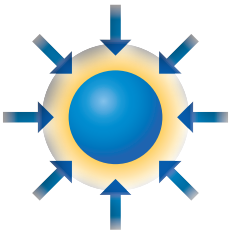


العزل المغناطيسي: تنضغط البلازما وتعزل بوسطة المجال المغناطيسي.

العزل بالقصور الذاتي إذا نظرت إلى قوس كهربائي (تفريغ كهربائي مستمر في صورة شرر متكرر)، يتحرك سريعًا بحركة شبيهة لحركة وتر فستلاحظ أن هناك صعوبة كبيرة في أن تحافظ على البلازما في شكل ثابت.

في مفاعل العزل بالقصور الذاتي، تضاء كُريّة صغيرة الحجم من الديوتيريوم- التريتيوم المتجمد من كل الجوانب بوساطة حزم ليزر قوية جدًّا. تُسخِّن حزم الليزر هذه الطبقة الخارجية للكريّة فتنفجر سريعًا. وبصورة متزامنة يُضغط المتبقي من الكرية، ويسخّن إلى درجة كبيرة، يبدأ عندها الاندماج النووي.

تعمل الطاقة الناتجة عن اندماج الكُرية على زيادة الطاقة التي تُستخدم لتسخين الكرية، فيندمج سيل من الكريات الواحدة تلو الأخرى للحصول على تحفيز مستمر، ويتم تجميع الحرارة الناتجة لإنتاج بخار لتشغيل التوربينات.



في العزل بالقصور الذاتي، تكوّن حزم من الضوء أو الأشعة السينية الناتجة عن تسخين سطح الكُريات سريعًا بالليزر - غلافًا يحيط بالبلازما. أما الوقود المتبقي فيضغط بوساطة تيار من البخار الناتج عن سطح المادة الساخن.

المستقبل في الوقت الذي لا يزال الاندماج النووي الحراري مستمرًّا في كلا النوعين من المفاعلات النووية، يواجه الباحثون صعوبة في تحقيق التفاعل المتعادل (أي أن الطاقة الناتجة عن التفاعل تزيد على الطاقة اللازمة للمحافظة على استمرار التفاعل). والتقدم الذي يتم إنجازه في تصميم المفاعل النووي الحراري العملي يعدّ مكلفًا وبطيئًا، إلا أن الأمل في تحقيق ذلك كبير. ولا يخلو مفاعل الاندماج تمامًا من المخلّفات المشعة الخطرة؛ لأن النيوترونات تنتج في مفاعلات الاندماج، لكن بما أن الوقود غير مشع بنفسه فإنه يمكن تجاهل المخلفات النووية.

التوسع في البحث

1. **التحليل** لماذا يبدو المفاعل النووي الحراري مصدر طاقة مفضل؟
2. **المقارنة** درست ثلاثة أنواع من محطات توليد الطاقة الحرارية الكهربائية. ما الميزات العامة التي تمتاز بها كل من هذه المحطات؟

الفصل 3
دليل الدراسة

3–1 النواة The Nucleus

المفردات
- العدد الذري
- وحدة الكتلة الذرية
- العدد الكتلي
- النويدة (نواة النظير)
- القوة النووية القوية
- النيوكليونات
- طاقة الربط النووية
- نقص الكتلة

الفكرة الرئيسة : طاقة الربط النووية تمثل النقص في كتلة النواة.
- عدد البروتونات في النواة يمثل بالعدد الذري Z.
- مجموع عدد البروتونات والنيوترونات في النواة يساوي العدد الكتلي A.
- الذرات التي لها العدد نفسه من البروتونات وعدد نيوترونات مختلف تسمى النظائر.
- تربط القوة النووية القوية مكوّنات النواة معًا.
- تحسب الطاقة المتحررة في التفاعل النووي بحساب نقص الكتلة، وهو الفرق بين كتلة الجسيمات قبل التفاعل وبعده من العلاقة $E= mc^2$
- طاقة الربط النووية هي الطاقة المكافئة لنقص الكتلة.

3–2 الاضمحلال النووي والتفاعلات النووية Nuclear Decay and Reactions

المفردات
- المواد المشعة
- انبعاث ألفا
- انبعاث بيتا
- انبعاث جاما
- التفاعل النووي
- عمر النصف
- النشاطية
- الانشطار النووي
- التفاعل المتسلسل
- الاندماج النووي

الفكرة الرئيسة : الاضمحلال الإشعاعي يؤدي إلى انبعاث جسيمات ذرية وطاقة، ويمكن أن تنتج عناصر جديدة.
- تضمحل النواة غير المستقرة متحولّة إلى عنصر آخر.
- يُنتج الاضمحلال الإشعاعي ثلاثة أنواع من الجسيمات، هي: جسيمات ألفا (α) وهي أنوية هيليوم، وجسيمات بيتا وهي إلكترونات عالية السرعة، وأشعة جاما (γ) وهي أشعة مكوّنة من فوتونات عالية الطاقة.
- في التفاعلات النووية، لا يتغير مجموع العدد الكتلي A، ولا الشحنة الكلية Z.
- في الانشطار النووي تنقسم نواة اليورانيوم إلى نواتين أصغر وينبعث نيوترونات وطاقة.
- تستخدم المفاعلات النووية الطاقة المتحررة من الانشطار النووي لتوليد طاقة كهربائية.
- عمر النصف للنظير المشع هو الزمن اللازم لتحول نصف عدد أنويته. بعد عدد n من فترات عمر النصف تكون: الكمية المتبقية $= N_0 (1/2)^n$
- إن عدد اضمحلالات العينة المشعة لكل ثانية تمثل النشاطية الإشعاعية.

3–3 وحدات بناء المادة The Building Blocks of Matter

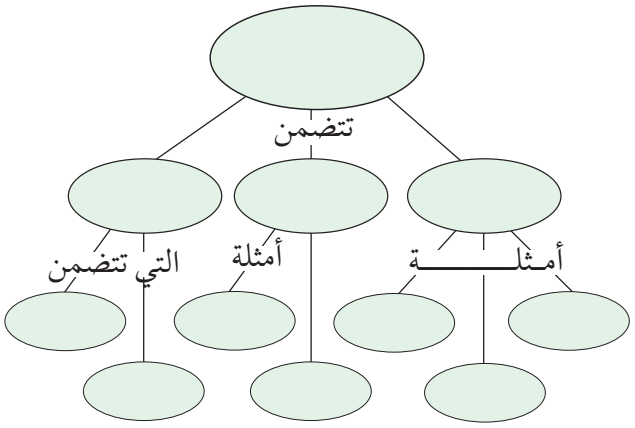
المفردات
- الكواركات
- اللبتونات
- النموذج المعياري
- حاملات القوة
- إنتاج الزوج
- القوة النووية الضعيفة

الفكرة الرئيسة : تتكون المادة من الكواركات واللبتونات وتتفاعل من خلال حاملات القوة.
- المسارعات الخطية والسنكترونات تنتج جسيمات عالية الطاقة.
- يستخدم عداد جايجر- مولر، وحجرة السحابة، وكواشف الجسيمات الأخرى، التأين الناتج عن شحن الجسيمات عند عبورها خلال المادة.
- تبدو كل المادة أنها تتكون من الكواركات واللبتونات.
- تتفاعل المادة مع مادة أخرى عن طريق جسيمات تسمى حاملات القوة.
- النموذج المعياري يتضمن الكواركات واللبتونات وحاملات الطاقة.
- عندما تتحد جسيمات ضديد المادة المماثلة مع جسيمات المادة تتحول كتلتها وطاقتها إلى طاقة أوإلى مادة أخف –زوج من ضديد الجسيم.

الفصل 3
التقويم

خريطة المفاهيم

39. نظّم المصطلحات التالية في خريطة المفاهيم: النموذج المعياري، الكواركات، أشعة جاما، حاملات القوة، البروتونات، النيوترونات، اللبتونات، بوزونات W، نيوترينات، إلكترونات، جلونات.



إتقان المفاهيم

40. ما القوة التي تدفع النيوكليونات داخل النواة ليبتعد بعضها عن بعض؟ ما القوة التي تعمل على ربط مكوّنات النواة معًا داخل النواة؟

41. عرّف نقص كتلة النواة. ما سببها؟

42. أي الأنوية غير مستقرة عمومًا: الصغيرة أم الكبيرة؟

43. ما النظير الذي له عدد أكبر من البروتونات: اليورانيوم 235 أم اليورانيوم 238؟

44. عرّف مفهوم التحول كما يستخدم في الفيزياء، واذكر مثالاً عليه.

45. **الجسيم المُشَع** ما الأسماء الشائعة لكل من: جسيم ألفا، وجسيم بيتا، وإشعاع جاما؟

46. ما الكميتان اللتان يجب أن تكونا محفوظتان دائمًا في أي تفاعل نووي؟

47. **الطاقة النووية** ما سلسلة العمليات التي يجب أن تحدث حتى يحدث التفاعل المتسلسل؟

48. **الطاقة النووية** ما الدور الذي يؤديه المهدئ في مفاعل الانشطار؟

49. الانشطار النووي والاندماج النووي عمليتان متعاكستان. كيف تحرر كل منهما الطاقة؟

50. **فيزياء الطاقة العالية** لماذا لا يعمل المسارع الخطي بالنيوترونات؟

51. **القوى** في أي التفاعلات الأربعة التالية (القوية، الضعيفة، الكهرومغناطيسية، الجاذبية) تشارك الجسيمات التالية؟

a. إلكترون

b. بروتون

c. نيوترينو

52. ماذا يحدث للعدد الذري والعدد الكتلي للنواة التي تشع بوزترونًا؟

53. **ضديد المادة** ماذا يحدث إذا سقط حجر نيزكي يتكوّن من ضديد بروتونات، وضديد نيوترونات وبوزترونات على الأرض؟

تطبيق المفاهيم

54. **الانشطار** يدّعي أحد المواقع الإلكترونية أن العلماء سيكونون قادرين على إخضاع الحديد للانشطار النووي. هل يمكن أن يكون هذا الادعاء صحيحًا؟ فسّر.

55. استخدم الرسم البياني لطاقة الربط لكل نوية في الشكل 2–3، لتحديد ما إذا كان التفاعل $^{2}_{1}H + ^{1}_{1}H \longrightarrow ^{3}_{2}He$ ممكنًا من حيث الطاقة؟

56. **النظائر** وضح الفرق بين النظائر المشعة التي تنتج اصطناعيًّا، وتلك التي تنتج طبيعيًّا.

57. **المفاعل النووي** في المفاعل النووي، يتدفق الماء الذي يعبر من قلب المفاعل خلال حلقة واحدة، بينما يتدفق الماء الذي يولّد البخار لتحريك التوربينات خلال الحلقة الثانية. لماذا توجد حلقتان؟

58. انشطار نواة اليورانيوم، واندماج أربعة أنوية هيدروجين لإنتاج نواة الهيليوم، كلاهما ينتج طاقة.

a. أيهما ينتج طاقة أكبر؟

b. في أي الحالتين التاليتين تكون الطاقة الناتجة أكبر: انشطار كيلوجرام واحد من أنوية اليورانيوم، أم اندماج كيلوجرام من الهيدروجين؟

c. لماذا تختلف إجابة الجزأين **a** و **b**؟

إتقان حل المسائل

3–1 النواة

59. ما الجسيمات التي تكوّن ذرة $^{109}_{47}Ag$؟ وما عدد كل منه؟

60. ما رمز النظير (الذي يستخدم في المعادلات النووية) لذرة زنك مكوّنة من 30 بروتونًا و 34 نيوترونًا؟

61. نظير الكبريت $^{32}_{16}S$ له كتلة نووية مقدارها 31.97207 u ما مقدار:

a. نقص الكتلة للنظير؟

b. طاقة الربط النووية لنواة الكبريت؟

c. طاقة الربط لكل نيوكليون؟

62. لنظير النيتروجين $^{12}_{7}N$ كتلة نووية مقدارها 12.0188 u ما مقدار:

a. طاقة الربط لكل نيوكليون؟

b. أيهما يحتاج إلى طاقة أكبر: فصل النيوكليون من نواة $^{12}_{7}N$ أو من نواة $^{14}_{7}N$؟ علما بأن كتلة $^{14}_{7}N$ تساوي 14.00307 u

63. يبتعد بروتونان موجبا الشحنة في نواة الهيليوم أحدهما عن الآخر مسافة 2.0×10^{-15} m تقريبًا. استخدم قانون كولوم، لإيجاد القوة الكهربائية للتنافر بين البروتونين. سوف تعطيك الإجابة مؤشرًا عن مقدار القوة النووية القوية.

64. إذا كانت طاقة الربط النووية لنواة الهيليوم $^{4}_{2}He$ −28.3 MeV فاحسب كتلة نظير الهيليوم بوحدة الكتلة الذرية.

3–2 الاضمحلال النووي والتفاعلات النووية

65. عمر النصف لنظير معين 3.0 day، ما النسبة المئوية للمادة الأصلية التي ستبقى بعد:

a. 6.0 day؟ **b.** 9.0 day؟ **c.** 12 day؟

66. اكتب المعادلة النووية الكاملة لانبعاث ألفا للنظير $^{222}_{86}Rn$.

67. اكتب المعادلة النووية الكاملة لانبعاث بيتا من النظير $^{89}_{36}Kr$.

68. أكمل المعادلات النووية التالية:

a. $^{225}_{89}Ac \rightarrow {}^{4}_{2}He + ____$

b. $^{227}_{88}Ra \rightarrow {}^{0}_{-1}e + ____ + ____$

c. $^{65}_{29}Cu + {}^{1}_{0}n \rightarrow ____ \rightarrow {}^{1}_{1}p + ____$

d. $^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{96}_{40}Zr + 3({}^{1}_{0}n) + ____$

69. عندما يُقذف نظير البورون $^{11}_{5}B$ ببروتونات فإنه يمتص بروتونًا ويطلق نيوترونًا، أجب عن الأسئلة التالية:

a. ما العنصر المتكوّن؟

b. اكتب المعادلة النووية لهذا التفاعل.

c. النظير المتكون مشع، ويضمحل بوساطة انبعاث بوزترون. اكتب المعادلة النووية الكاملة لهذا التفاعل.

70. خلال تفاعل الاندماج، يتحد ديوترونان $^{2}_{1}H$، لتكوين نظير الهيليوم $^{3}_{2}He$، ما الجسيم الآخر الذي تكوّن؟

71. إذا كان عمر النصف لنظير البولونيوم $^{209}_{84}Po$ يبلغ 103 سنة، فكم تستغرق عينة مقدارها 100 g حتى تضمحل ليبقى منها 3.1 g؟

تقويم الفصل 3

72. في إحدى حوادث مختبر أبحاث، انسكب نظير مشع عمر النصف له ثلاثة أيام. وكان الإشعاع ثمانية أضعاف الكمية العظمى المسموح بها. كم يجب أن ينتظر العاملون قبل أن يستطيعوا الدخول إلى المختبر؟

3–3 وحدات بناء المادة

73. ما شحنة الجسيم الذي يتكوّن من ثلاثة كواركات أعلى؟

74. شحنة ضديد الكوارك معاكسة لشحنة الكوارك. يتكوّن بيون من كوارك أعلى ومن ضديد كوارك أسفل $u\bar{d}$. ما شحنة هذا البيون؟

75. تتكون البيونات من كوارك وضديد الكوارك. أوجد شحنة البيون الذي يتكون من:

a. $u\bar{u}$

b. $d\bar{u}$

c. $d\bar{d}$

76. الباريونات جسيمات تتكون من ثلاثة كواركات. أوجد الشحنة على كل من الباريونات التالية:

a. نيوترون ddu.

b. ضديد بروتون $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$.

77. نصف قطر السنكروترون في مختبر فيرمي 2.0 km، وتتحرك البروتونات التي تدور داخله بسرعة تساوي سرعة الضوء في الفراغ تقريبًا، أجب عما يلي:

a. ما الفترة الزمنية التي يحتاج إليها البروتون حتى يكمل دورة كاملة.

b. تدخل البروتونات الحلقة بطاقة 8.0 GeV فتكتسب طاقة 2.5 MeV في كل دورة. ما عدد الدورات التي يجب أن يكملها قبل أن تصل طاقتها إلى 400.0 GeV؟

c. ما الفترة الزمنية التي تحتاج إليها البروتونات حتى تتسارع إلى 400.0 GeV؟

d. ما المسافة التي تقطعها البروتونات خلال هذا التسارع؟

مراجعة عامة

78. كل الأنوية التالية تستطيع أن تمتص جسيم ألفا. افترض أنه لا تنبعث جسيمات ثانوية من النواة، أكمل المعادلات التالية:

a. $^{14}_{7}N + ^{4}_{2}He \longrightarrow$ ——

b. $^{27}_{13}Al + ^{4}_{2}He \longrightarrow$ ——

79. عمر النصف للرادون $^{211}_{86}Rn$ يساوي 15 h، ما الكمية المتبقيةمن العينة بعد مرور 60 h؟

80. إحدى تفاعلات الاندماج البسيطة تتضمن إنتاج الديوتيريوم $^{2}_{1}H$ (2.014102 u) من نيوترون وبروتون. اكتب تفاعل الاندماج الكامل، وأوجد مقدار الطاقة المتحررة.

التفكير الناقد

81. **استنتج** لأشعة جاما زخم. وزخم شعاع جاما ذي الطاقة E يساوي E/c، حيث c سرعة الضوء. عندما يضمحل زوج إلكترون–بوزترون إلى أشعة جاما فإن كلًّا من الزخم والطاقة يجب أن يكونا محفوظين. إذا كان مجموع طاقات أشعة جاما تساوي 1.02 MeV وكان كلّ من البوزترون والإلكترون مبدئيًّا في حالة سكون، فكم يجب أن يكون مقدار واتجاه زخم إشعاعين من أشعة جاما؟

82. **استنتج** إذا كان زوج إلكترون-بوزترون مبدئيًّا في حالة سكون، ويستطيع أن يضمحل إلى ثلاثة إشعاعات جاما، وكانت إشعاعات جاما الثلاثة لها طاقات متساوية، فكيف يجب أن تكون اتجاهاتها النسبية؟ وضّح بالرسم.

83. **قدّر** يُطلق تفاعل اندماجي واحد في الشمس طاقة مقدارها 25 MeV تقريبًا. قدّر عدد التفاعلات التي تحدث في كل ثانية من سطوع الشمس الذي يكون عنده معدل الطاقة المنبعثة في الثانية 4×10^{26} W؟

الكتابة في الفيزياء

84. ابحث في الفهم الحالي للمادة المعتمة في الكون، وما أهمية هذه المادة لعلماء الكونيات؟ وما مكونات هذه المادة؟

85. ابحث في تعقّب الكوارك العلوي. لماذا افترض الفيزيائيون وجوده؟

86. ابحث في استخدامات النظائر المشعة في المجالات الطبية في مملكة البحرين.

مراجعة تراكمية

87. إلكترون طول موجة دي برولي له 400.0 nm، احسب:

a. سرعة الإلكترون.

b. طاقة الإلكترون بوحدة eV.

88. يدخل فوتون طاقته 14.0 eV ذرة هيدروجين في حالة استقرار ويؤينها. ما مقدار الطاقة الحركية التي ينطلق بها الإلكترون من الذرة؟

89. **تفسير البيانات** يُراقَب نظير يخضع لاضمحلال إشعاعي بوساطة كاشف إشعاعي، فيسجّل عدد العدات كل خمس دقائق. حسب النتائج الموضحة في **الجدول 4–3** أزيلت العينة بعد ذلك، وسجّل الكاشف الإشعاعي 20 عدة ناتجة عن الأشعة الكونية خلال 5 دقائق. أوجد عمر نصف النظير. لاحظ أنه يجب أن تطرح 20 عدة أولية من كل نتيجة. ثم عيّن العدات كدالة رياضية مع الزمن برسم بياني، وحدد عمر النصف.

الجدول 4-3

قياسات الاضمحلال الإشعاعي	
الزمن (دقيقة)	العدات (لكل 5 دقائق)
0	987
5	375
10	150
15	70
20	40
25	25
30	18

اختبار مقنن

أسئلة اختيار من متعدد

اختر رمز الإجابة الصحيحة فيما يلي:

1. كم عدد البروتونات، النيوترونات، والإلكترونات في نظير النيكل– 60 $^{60}_{28}Ni$ ؟

	البروتونات	النيوترونات	الإلكترونات
(A)	28	32	28
(B)	28	28	32
(C)	32	32	28
(D)	32	28	28

2. ما الذي يحدث في التفاعل التالي:

$$^{212}_{82}Pb \longrightarrow {}^{212}_{83}Bi + e^- + \bar{\nu}$$

(A) انبعاث ألفا
(B) انبعاث بيتا
(C) انبعاث جاما
(D) فقد بروتون

3. ما الناتج عندما يخضع البولونيوم –214 $^{210}_{84}Po$ لانبعاث ألفا؟

(A) $^{206}_{82}Pb$
(B) $^{208}_{82}Pb$
(C) $^{210}_{85}Pb$
(D) $^{210}_{80}Pb$

4. حدد النظير المجهول في هذا التفاعل:

$$^{14}_{7}N \longrightarrow {}^{14}_{6}C + ؟ + \text{نيوترون}$$

(A) $^{1}_{1}H$
(B) $^{2}_{1}H$
(C) $^{3}_{1}H$
(D) $^{4}_{2}He$

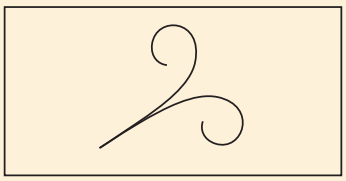
5. أي نوع من الانبعاث لا يغير عدد البروتونات أو النيوترونات في النواة؟

(A) البوزترون
(B) ألفا
(C) بيتا
(D) جاما

6. يتصادم إلكترون وبوزترون فيفني كل منهما الآخر، ويطلقان طاقتهما على شكل أشعة جاما. ما أقل طاقة لأشعة جاما؟ (الطاقة المكافئة لكتلة الإلكترون 0.51 Mev)

(A) 0.51 MeV
(B) 1.02 MeV
(C) 931.49 MeV
(D) 1863 MeV

7. يبيّن الرسم التوضيحي أدناه المسارات في حجرة الفقاعة التي تنتج عندما تضمحل أشعة جاما إلى بوزترون وإلكترون. لماذا لا تغادر أشعة جاما المسار؟



(A) تنتقل أشعة جاما بسرعة عالية جدًّا خلال مساراتها لكي يتم اكتشافها.

(B) أزواج من الجسيمات فقط يمكن أن تغادر المسارات في حجرة الفقاعة.

(C) يجب أن يمتلك الجسيم كتلة حتى يتفاعل مع السائل ويغادر المسار، وأشعة جاما عديمة الكتلة فعليًا.

(D) أشعة جاما متعادلة كهربائيًا، لذلك فلا تؤين السائل.

8. نظير البولونيوم– 210 له عمر نصف 138 day، ما مقدار الكمية المتبقية من عينة 2.34 kg بعد مرور أربعة أعوام؟

(A) 0.644 mg
(B) 1.50 mg
(C) 1.51 g
(D) 10.6 g

9. تبعث عينة من اليود –131 المشع جسيمات بيتا، بمعدل 2.5×10^8 Bq، إذا كان عمر النصف لليود 8 أيام. ما النشاطية بعد مرور 16 يومًا؟

(A) 1.6×10^7 Bq
(B) 6.2×10^7 Bq
(C) 1.2×10^8 Bq
(D) 2.5×10^8 Bq

الأسئلة الممتدة

10. يطلق انشطار نواة يورانيوم– 235 طاقة 3.2×10^{-11} J تقريبًا. وطن واحد من مادة TNT يحرر طاقة 4×10^9 J تقريبًا. كم عدد أنوية اليورانيوم –235 في قنبلة الانشطار النووي الذي يطلق طاقة تكافئ 20000 طن من مادة TNT؟

مصادر تعليمية للطالب

- دليل الرياضيات
- الجداول
- المصطلحات
- الجدول الدوري للعناصر

I. الأسس والقوى والجذور والقيمة المطلقة Exponents , Powers , Roots , and Absolute value

الأسس Exponents

الأس عبارة عن عدد يخبرك بعدد المرات التي استعمل فيها الأساس a كعامل، ويكتب الأس على صيغة رمز علوي، ففي الحد a^n، يمثل الرمز a الأساس ويمثل الرمز n الأس.

ويسمى المقدار a^n القوة النونية للرقم a أو أن الرقم a مرفوع للقوة n.

الأس

$$a^n$$

الأساس

ارتباط الرياضيات مع الفيزياء إن الرمز السفلي لا يمثل الأس، وفي الفيزياء يمثل الرمز السفلي تعبيرًا آخر للمتغير.

فمثلا v_0 يمكن أن تستعمل لتعبر عن السرعة عند الزمن 0، ولذلك فإن الرمز السفلي يعتبر جزءًا من المتغير.

الأس الموجب لأي رقم غير صفري a ، ولأي عدد صحيح n ،

$$a^n = (a_1)(a_2)(a_3)\ldots(a_n)$$

مثال: بسّط الحدود الأسية التالية:

$$10^4 = (10)(10)(10)(10) = 10{,}000$$

$$2^3 = (2)(2)(2) = 8$$

الأس الصفري لأي رقم a غير صفري،

$$a^0 = 1$$

مثال: بسّط الحدود الأسية الصفرية التالية:

$$2^0 = 1$$

$$13^0 = 1$$

الأس السالب لأي رقم a غير صفري، ولأي عدد صحيح n ،

$$a^{-n} = \frac{1}{a^n}$$

مثال: اكتب الحدود الأسية السالبة الآتية في صورة كسور.

$$2^{-2} = \frac{1}{2^2} = \frac{1}{4} \qquad 2^{-1} = \frac{1}{2^1} = \frac{1}{2}$$

الجذور التربيعية والجذور التكعيبية Square and Cube Roots

الجذر التربيعي للرقم يساوي أحد معامليه الاثنين المتساويين. ويعبّر الرمز الجذري $\sqrt{\ }$ ، عن الجذر التربيعي. ويمكن أن يُعبّر عن الجذر التربيعي بالأس $\frac{1}{2}$ كما في $\sqrt{b} = b^{\frac{1}{2}}$. ويمكنك استعمال الآلة الحاسبة لإيجاد قيمة الجذور التربيعية.

أمثلة: بسّط حدود الجذور التربيعية الآتية:

$\sqrt{a^2} = \sqrt{(a)\ (a)} = a$

$\sqrt{9} = \sqrt{(3)\ (3)} = 3$

تتضمن الإجابة صفرًا عن يمين الفاصلة العشرية وذلك للإبقاء على رقمين معنويين. $\sqrt{64} = \sqrt{(8.0)\ (8.0)} = 8.0$

ضع صفرين عن يمين إجابة الآلة الحاسبة للإبقاء على أربعة أرقام معنوية. $\sqrt{38.44} = 6.200$

قرّب إجابة الآلة الحاسبة للإبقاء على رقمين معنويين. $\sqrt{39} = 6.244997 = 6.2$

إن الجذر التكعيبي للرقم يمثل أحد معاملاته الثلاثة المتساوية. ويعبر الرمز الجذري $\sqrt[3]{\ }$ أي استعمال الرقم 3، عن الجذر التكعيبي. كما يمكن تمثيل الجذر التكعيبي أيضًا في صورة أس $\frac{1}{3}$ كما في $\sqrt[3]{b} = b^{\frac{1}{3}}$.

مثال: بسّط حدود الجذر التكعيبي التالية:

$\sqrt[3]{125} = \sqrt[3]{(5.00)(5.00)(5.00)} = 5.00$

$\sqrt[3]{39.304} = 3.4000$

مسائل تدريبية

1. أوجد ناتج كل جذر، ومن ثم قرّب الإجابة إلى أقرب مئة.

a. $\sqrt{22}$

b. $\sqrt[3]{729}$

c. $\sqrt{676}$

d. $\sqrt[3]{46.656}$

2. بسّط الجذور التالية من دون استعمال الرمز الجذري:

a. $\sqrt{16a^2b^4}$

b. $\sqrt{9t^6}$

3. اكتب الجذور الآتية على الصورة الأسية:

a. $\sqrt{n^3}$

b. $\frac{1}{\sqrt{a}}$

إجراء العمليات باستخدام الأسس Operations With Exponents

لإجراء العمليات التالية باستخدام الأسس فإن كلًّا من a ، b يمكن أن يكونا أرقامًا أو متغيرات.

ضرب القوى: لإجراء عملية ضرب حدود لها الأساس نفسه اجمع الأسس، كما هو موضح في الصيغة التالية:

$(a^m)(a^n) = a^{m+n}$

قسمة القوى: لإجراء عملية قسمة حدود لها الأساس نفسه اطرح الأسس، كما هو موضح في الصيغة التالية:

$a^m / a^n = a^{m-n}$

القوة مرفوعة لقوة: لايجاد ناتج قوة مرفوعة لقوة، استخدم الأساس نفسه واضرب الأسس في بعضها، كما هو موضح في الصفحة التالية: $(a^m)^n = a^{mn}$

الجذر مرفوعة لقوة: لإيجاد ناتج جذر مرفوع لقوة استخدم الأساس نفسه وقسّم أس القوة على أس الجذر، كما هو موضح في الصيغة التالية: $\sqrt[n]{a^m} = a^{m/n}$

القوة لحاصل الضرب: لإيجاد القوة لحاصل الضرب a و b ، ارفع كليهما للقوة نفسها، ثم أوجد حاصل ضربهما معًا، كما في $(ab)^n = a^n b^n$

مسائل تدريبية

4. اكتب الصيغة المكافئة مستعملًا خصائص الأسس.

a. $x^2 t / x^3$ **b.** $\sqrt{t^3}$ **c.** $\sqrt{x}$ **d.** x^2

5. بسّط $\frac{m}{q}\sqrt{\frac{2qv}{m}}$

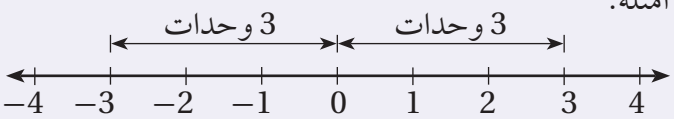
القيمة المطلقة Absolute Value

إن القيمة المطلقة للرقم n عبارة عن قيمته بغض النظر عن إشارته. وتكتب القيمة المطلقة للرقم n على صورة |n|، ولأن المقادير لا تكون أقل من الصفر فإن القيم المطلقة دائمًا أكبر من صفر أو تساوي صفرًا.

أمثلة:

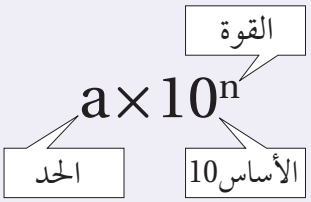
$|3| = 3$

$|-3| = 3$



II. الدلالة العلمية Scientific Notation

إن الرقم على الصيغة $a \times 10^n$ مكتوب بدلالته العلمية، حيث $1 \le a \le 10$، والرقم n عدد صحيح. الأساس 10 مرفوع للقوة n والحد a يجب أن يكون أقل من 10.



ارتباط الرياضيات مع الفيزياء يستعمل الفيزيائيون الدلالة العلمية مع القياسات التي تزيد على 10 أو الأقل من 1 للتعبير عنها، والمقارنة بينها، وحسابها. فمثلاً تكتب كتلة البروتون على صورة 6.73×10^{-28} kg، وتكتب كثافة الماء على الصورة 1.000×10^{3} kg/m³ وهذا يوضح استعمال قواعد الأرقام المعنوية، حيث يساوي هذا القياس 1000 تمامًا، وذلك لأربعة أرقام معنوية. ولذلك فعند كتابة كثافة الماء على الصورة 1000 kg/m³ سوف يشير ذلك إلى أن الرقم يتضمن رقمًا معنويًّا واحدًا، وهذا غير صحيح. لقد ساعدت الدلالة العلمية الفيزيائيين على الحفاظ على المسار الدقيق للأرقام المعنوية.

الأرقام الكبيرة، واستخدام الأسس الموجبة Large Numbers – Using Positive Exponents

إن عملية الضرب للقوة 10 تشبه تمامًا عملية تحريك النقطة العشرية لنفس عدد المنازل إلى يسار العدد (إذا كانت القوة سالبة) أو إلى اليمين (إذا كانت القوة موجبة). وللتعبير عن الرقم الكبير في الدلالة العلمية حدد أولاً قيمة الحد a، $1 \le a < 10$، ثم عد المنازل العشرية من النقطة العشرية في الحد a لغاية النقطة العشرية في العدد. ثم استعمل العدد كقوة للرقم 10. وتبين الآلة الحاسبة الدلالة العلمية باستعمال e للأسس كما في $2.4\ e{+}11 = 2.4\times10^{11}$ وبعض الآلات الحاسبة تستخدم E لتبيان الأس أو يوجد غالبًا على الشاشة موضع مخصص، حيث تظهر أرقام ذات أحجام صغيرة نسبيًّا لتمثل الأسس في الآلة الحاسبة.

مثال: اكتب 7,530,000 بدلالته العلمية.

إن قيمة a هي 7.53 (النقطة العشرية عن يمين أول رقم غير صفري)، لذلك سيكون الشكل في صورة 7.53×10^{n}.

هناك ستة منازل عشرية، لذلك فإن القوة هي 6 $\quad 7{,}530{,}000 = 7.53\times10^{6}$

لكتابة الصورة القياسية للرقم المعبَّر عنه بدلالته العلمية اكتب قيمة a، وضع أصفارًا إضافية عن يمين الرقم. استعمل القوة وحرّك النقطة العشرية للرقم a عدة منازل إلى اليمين.

مثال: اكتب الرقم التالي في صورته القياسية

$$2.389\times10^{5} = 2.38900\times10^{5} = 238{,}900$$

الأرقام الصغيرة، واستخدام الأسس السالبة Small Numbers–Using Negative Exponents

للتعبير عن الأرقام الصغيرة بدلالتها العلمية حدد أولاً قيمة a ، $1 \le a < 10$ ، ثم احسب عدد المنازل العشرية مبتدئًا من النقطة العشرية للرقم a حتى النقطة العشرية في الرقم.

استعمل ذلك العدد قوةً للأساس 10 . إن عملية ضرب الرقم في قوة سالبة مماثل تمامًا لعملية القسمة على ذلك الرقم مع القوة الموجبة المرافقة.

مثال: اكتب 0.000000285 بدلالته العلمية

إن قيمة a هي 2.85 (النقطة العشرية تقع عن يمين الرقم الأول غير الصفري) لذلك فإن الشكل سيكون في صورة 2.85×10^{n}.

توجد سبعة منازل عشرية، لذلك فإن القوة هي 7 – $0.000000285 = 2.85\times10^{-7}$

وللتعبير عن الأرقام الصغيرة بصورتها القياسية، اكتب قيمة الرقم a، وقم بإضافة أصفار إضافية عن يسار الرقم a. استعمل القوة وحرّك النقطة العشرية في a عدة منازل إلى اليسار.

مثال: $1.6 \times 10^{-4} = 00001.6 \times 10^{-4} = 0.00016$

6. عبّر عن كل رقم بدلالته العلمية:

a. 456,000,000 **b.** 0.000020

7. عبّر عن كل رقم بصورته القياسية.

a. 3.03×10^{-7} **b.** 9.7×10^{10}

إجراء العمليات الرياضية بدلالتها العلمية Operations with Scientific Notation

لإجراء العمليات الرياضية للأرقام المعبّر عنها بدلالتها العلمية نستخدم خصائص الأسس.

عملية الضرب أوجد حاصل عملية ضرب الحدود، ثم اجمع القوى للأساس 10.

جمّع الحدود والأرقام ذات الأساس 10 $(4.0\times10^{-8})\ (1.2\times10^{5}) = (4.0\times1.2)\ (10^{-8}\times10^{5})$

أوجد حاصل ضرب الحدود $= (4.8)\ (10^{-8+5})$

اجمع القوى للأساس 10 $= (4.8)\ (10^{-3})$

أعد صياغة النتيجة بدلالتها العلمية $= 4.8\times10^{-3}$

عملية القسمة قم بإجراء عملية قسمة الأرقام الممثلة للقواعد، ثم اطرح أسس الأساس 10.

مثال: بسّط

جمّع الحدود والأرقام ذات الأساس 10 $\frac{9.60\times10^{7}}{1.60\times10^{3}} = \left(\frac{9.60}{1.60}\right)\times\left(\frac{10^{7}}{10^{3}}\right)$

قسّم الحدود واطرح القوس للأساس 10 $= 6.00 \times 10^{7-3}$

$= 6.00 \times 10^{4}$

عمليتا الجمع والطرح إن إجراء عملية الجمع وعملية الطرح للأرقام بدلالتها العلمية هي عملية تحدٍّ أكبر؛ لأن قوى الأساس 10 يجب أن تكون متماثلة لكي تستطيع جمع أو طرح الأرقام. وهذا يعني أن أحد تلك الأرقام يمكن أن يحتاج إلى إعادة كتابته بدلالة قوة مختلفة للأساس 10، بينما إذا كانت القوى للأساس 10 متساوية فاستعمل الخاصية التوزيعية للأعداد.

مثال: بسّط

جمّع الحدود $(3.2\times10^5) + (4.8\times10^5) = (3.2+4.8)\times10^5$

اجمع الحدود $= 8.0\times10^5$

مثال: بسّط

أعد كتابة 4.8×10^4 على صورة 0.48×10^5 $(3.2\times10^5) + (4.8\times10^4) = (3.2\times10^5) + (0.48\times10^5)$

جمّع الحدود $= (3.2+0.48)\times10^5$

اجمع الحدود $= 3.68\times10^5$

قرّب النتيجة مستعملًا قاعدة الجمع / الطرح للأرقام المعنوية. $= 3.7\times10^5$

مسائل تدريبية

8. احسب نتيجة كل من التعابير التالية، وعبّر عن النتيجة بدلالتها العلمية.

a. $(4.0\times10^8)\ (5.2\times10^{-4})$ **b.** $(2.4\times10^3) + (8.0\times10^4)$

III. المعادلات Equations

ترتيب العمليات Order of Operations

اتفق العلماء والرياضيون على مجموعة من الخطوات أو القواعد، تسمى ترتيب العمليات، لذلك يفسّر كل شخص الرموز الرياضية بالطريقة نفسها. اتّبع هذه الخطوات بالترتيب عندما تريد تقدير نتيجة تعبير رياضي أو عند استخدام صيغة رياضية معينة.

1. بسّط التعابير الرياضية داخل الرموز التجميعية، مثل القوسين ( )، والقوسين المعقوفين [ ]، والأقواس المزدوجة { }، وأعمدة الكسر.

2. قدّر قيمة جميع القوى والجذور.

3. نفّذ جميع عمليات الضرب و / أو جميع عمليات القسمة من اليسار إلى اليمين.

4. نفّذ جميع عمليات الجمع و / أو جميع عمليات الطرح من اليسار إلى اليمين.

مثال: بسّط التعبير التالي:

ترتيب العمليات: الخطوة 1 $4+3\ (4-1)-2^3 = 4+3\ (3)-2^3$

ترتيب العمليات: الخطوة 2 $=4+3\ (3)-8$

ترتيب العمليات: الخطوة 3 $=4+9-8$

ترتيب العمليات: الخطوة 4 $= 5$

ارتباط الرياضيات مع الفيزياء يوضح المثال السابق تنفيذ عملية ترتيب العمليات خطوة بخطوة. فعند حل المسائل الفيزيائية لا تجري عملية التقريب للرقم الصحيح للأرقام المعنوية إلا بعد حساب النتيجة النهائية. في حالة الحسابات التي تتضمن تعابير رياضية في البسط وتعابير رياضية في المقام عليك معاملة كل من البسط والمقام بوصفهما مجموعتين منفصلتين، ثم جد نتيجة كل مجموعة قبل أن تجري عملية قسمة البسط على المقام، لذلك فإن قاعدة الضرب / القسمة تستخدم لحساب الرقم النهائي للأرقام المعنوية.

حل المعادلات Solving Equations

إن حل المعادلة يعني إيجاد قيمة المتغير الذي يجعل المعادلة تعبيرًا رياضيًّا صحيحًا. وعند حل المعادلات طبّق خاصية التوزيع وخصائص التكافؤ، وإذا طبقت أيًّا من خصائص المتكافئات في أحد طرفي المعادلة وجب أن تطبق الخصائص نفسها في الطرف الآخر.

الخاصية التوزيعية لأي من الأعداد a ، b ، c يكون:

$a(b+c) = ab+ac$ $\qquad$ $a(b-c) = ab-ac$

مثال: استعمل الخاصية التوزيعية لتفكيك التعبير التالي:

$$3(x+2) = 3x + (3)(2)$$
$$= 3x + 6$$

خاصيتا الجمع والطرح للمتكافئات إذا تساوت كميتان وأضيف العدد نفسه أو طرح العدد نفسه من كليهما، فإن الكميات الناتجة متساوية أيضًا.

مثال: حل المعادلة $x - 3 = 7$ *مستعملًا خاصية الجمع*

$$x - 3 = 7$$
$$x - 3 + 3 = 7 + 3$$
$$x = 10$$

مثال: حل المعادلة $t + 2 = -5$ مستعملًا خاصية الطرح

$$t + 2 = -5$$
$$t + 2 - 2 = -5 - 2$$
$$t = -7$$

خاصيتا الضرب والقسمة للمتكافئات إذا ضربت أو قسمت كميتين متساويتين في/ على العدد نفسه، فستكون الكميات الناتجة متساوية أيضًا.

$$ac = bc$$
$$\frac{a}{c} = \frac{b}{c}, \text{ for } c \neq 0$$

مثال: حل المعادلة $\frac{1}{4}a = 3$ مستعملًا خاصية الضرب

$$\frac{1}{4}a = 3$$
$$(\frac{1}{4}a)(4) = 3(4)$$
$$a = 12$$

مثال: حل المعادلة $6n = 18$ مستخدمًا خاصية القسمة

$$6n = 18$$
$$\frac{6n}{6} = \frac{18}{6}$$
$$n = 3$$

مثال: حل المعادلة $2t + 8 = 5t - 4$ بالنسبة للمتغير t

$$2t + 8 = 5t - 4$$
$$8 + 4 = 5t - 2t$$
$$12 = 3t$$
$$4 = t$$

فصل المتغير Isolating aVariable

افترض معادلة تتضمن أكثر من متغير، لفصل المتغير– أيْ لحل المعادلة بالنسبة لذلك المتغير– اكتب معادلة ارتباط مكافئة بحيث يتضمن أحد طرفيها المتغير فقط بمعامل يساوي 1.

ارتباط الرياضيات في الفيزياء افصل المتغير P (الضغط) في معادلة قانون الغاز المثالي.

$$PV = nRT$$

قسّم طرفي المعادلة على V

$$\frac{PV}{V} = \frac{nRT}{V}$$

جمّع $(\frac{V}{V})$

$$P\left(\frac{V}{V}\right) = \frac{nRT}{V}$$

بالتعويض عن $\frac{V}{V} = 1$

$$P = \frac{nRT}{V}$$

مسائل تدريبية

9. حل المعادلات الآتية بالنسبة للمتغير x.

a. $2 + 3x = 17$

b. $x - 4 = 2 - 3x$

c. $t - 1 = \frac{x+4}{3}$

d. $a = \frac{b+x}{c}$

e. $6 = \frac{2x+3}{x}$

f. $ax + bx + c = d$

خاصية الجذر التربيعي Square Root Property

إذا كان كل من a ، n أعدادًا حقيقية، $n > 0$ و $a^2 = n$ ، فإن $a = \pm\sqrt{n}$.

ارتباط الرياضيات مع الفيزياء حل المعادلة بالنسبة للمتغير v في القانون الثاني لنيوتن لقمر يدور حول الأرض.

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{Gm_E m}{r^2}$$

اضرب طرفي المعادلة كليهما في المتغير r

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{rGm_E m}{r^2}$$

بالتعويض عن $\frac{r}{r} = 1$

$$mv^2 = \frac{Gm_E m}{r}$$

قسّم طرفي المعادلة على m .

$$\frac{mv^2}{m} = \frac{Gm_E m}{rm}$$

بالتعويض عن $\frac{m}{m} = 1$

$$v^2 = \frac{Gm_E}{r}$$

ضع الجذر التربيعي على طرفي المعادلة

$$\sqrt{v^2} = \pm\sqrt{\frac{Gm_E}{r}}$$

استعمل القيمة الموجبة للسرعة.

$$v = \sqrt{\frac{Gm_E}{r}}$$

عندما تستعمل خاصية الجذر التربيعي من المهم الانتباه للمتغير الذي ستقوم بحل المعادلة بالنسبة له. لأننا قمنا بحل المعادلة السابقة بالنسبة للسرعة v، لذلك لم يكن من المنطق أن نستعمل القيمة السالبة للجذر التربيعي، وأنت بحاجة أيضًا للأخذ بعين الاعتبار ما إذا كانت القيمة السالبة أو الموجبة ستعطيك الحل الصحيح، فمثلاً عندما تستعمل خاصية الجذر التربيعي لحل المعادلة بالنسبة للمتغير t فإن القيمة السالبة تشير إلى الفترة الزمنية قبل بدء الحالة التي تدرسها.

المعادلات التربيعية Quadratic Equations

التعبير العام للمعادلة التربيعية $ax^2 + bx + c = 0$ ، حيث $a \neq 0$، وتتضمن المعادلة التربيعية متغيرًا واحدًا مرفوعًا للقوة (الأس) 2 بالإضافة إلى المتغير نفسه مرفوعًا للأس 1 . كما يمكن تقدير حلول المعادلة التربيعية بوساطة التمثيل البياني باستعمال الآلة الحاسبة الراسمة بيانيًّا. إذا كانت $b = 0$ فإن الحد x غير موجود في المعادلة التربيعية. ويمكن حل المعادلة بفصل المتغير المربع، ثم إيجاد الجذر التربيعي لكل من طرفي المعادلة باستخدام خاصية الجذر التربيعي.

الصيغة التربيعية Quadratic Formula

إن حلول أي معادلة تربيعية يمكن إيجادها باستعمال الصيغة التربيعية، لذلك فإن حلول المعادلة $ax^2 + bx + c = 0$، حيث $a \neq 0$، تعطى من خلال المعادلة التالية:

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

وكما في حالة خاصية الجذر التربيعي، من المهم الأخذ بعين الاعتبار ما إذا كانت حلول الصيغة التربيعية تعطيك الحل الصحيح للمسألة التي بصدد حلّها. فعادةً يُمكنك إهمال أحد الحلول لكونه حلاًّ غير حقيقي. تتطلب حركة المقذوف غالبًا استعمال الصيغة التربيعية عند حل المعادلة، لذلك حافظ على واقعية الحل في ذهنك عند حل المعادلة.

مسائل تدريبية

10. حل المعادلات الآتية بالنسبة للمتغير x.

$4x^2 - 19 = 17$

$12 - 3x^2 = -9$

$x^2 - 2x - 24 = 0$

$24x^2 - 14x - 6 = 0$

حسابات الوحدات Dimensional Calculations

عند إجراء الحسابات عليك أن ترفق وحدة كل قياس مكتوبة في الحسابات، وجميع العمليات التي تتم في صورة أعداد تُجرى أيضًا مرفقة بوحداتها.

ارتباط الرياضيات مع الفيزياء إن معادلة تسارع الجاذبية الأرضية a يعطى من خلال المعادلة $a = \frac{2\Delta x}{\Delta t^2}$. فإذا سقط جسم سقوطًا حرًّا على القمر مسافة 20.5 m خلال 5.00 s . أوجد التسارع a على سطح القمر.

يقاس التسارع بوحدة m/s^2.

$$a = \frac{2\Delta x}{\Delta t^2}$$

$$a = \frac{2(20.5\ m)}{(5.00\ s)^2}$$

العدد 2 عدد دقيق، لذلك لن يؤثر في حساب الأرقام المعنوية

$$a = \frac{1.64\ m}{s^2}$$ مثل

احسب وقرّب حتى ثلاثة أرقام معنوية

أو مثل $a = 1.64\ m/s^2$

تحويل الوحدة استعمل معامل التحويل للتحويل من وحدة قياس إلى وحدة قياس أخرى من النوع نفسه، من وحدة الدقائق مثلاً إلى وحدة الثواني، وهذا يكافئ عملية الضرب في العدد 1 .

ارتباط الرياضيات مع الفيزياء جد x عندما $v_0 = 67\ m/s$ و $\Delta t = 5.0\ min$. استخدم المعادلة $\Delta x = v_0 \Delta t$

$$\frac{60\ s}{1\ min} = 1$$

$$\Delta x = v_0 \Delta t$$

$$\Delta x = \frac{67\ m}{s}\left(\frac{5.0\ min}{1}\right)\left(\frac{60\ s}{1\ min}\right)$$

اضرب في معامل التحويل $\left(\frac{60\ s}{1\ min}\right)$

$$\Delta x = 20100\ m = 2.0 \times 10^4\ m$$

احسب ثم قرّب إلى رقمين معنويين. إن العددين 60 s و 1 min مضبوطين ودقيقين، لذلك لن يؤثرا في حساب الأرقام المعنوية.

مسائل تدريبية

11. بسّط المعادلة $\Delta t = \frac{4.0\times10^2\ \text{m}}{16\ \text{m/s}}$

12. احسب السرعة المتجهة لقطعة قرميد ساقطة بعد مضي 5.0 s ، استعمل $a = -9.80\ \text{m/s}^2$ و $v = a\,\Delta t$.

13. أوجد حاصل ضرب الحدود: $\left(\frac{1\ \text{m}}{100\ \text{cm}}\right)\left(\frac{60\ \text{min}}{1\text{h}}\right)\left(\frac{60\ \text{s}}{1\ \text{min}}\right)\left(\frac{32\ \text{cm}}{1\text{s}}\right)$

14. في سجلّ الألعاب الأولمبية تم قطع المسافة 100.00 m خلال 9.87 s. ما السرعة بوحدة الكيلومترات لكل ساعة؟

تحليل الوحدات Dimensional Analysis

يعتبر تحليل الوحدات طريقة لتنفيذ العمليات الجبرية باستعمال الوحدات، وغالبًا ما يستعمل لاختبار صحة وحدات النتيجة النهائية وصحة المعادلة المستعملة، من دون إعادة تنفيذ الحسابات بصورة كاملة.

مثال فيزيائي تحقق من أن الإجابة النهائية للمعادلة $d_f = d_i + v_i t + \frac{1}{2}at^2$ وحدتها m

d_i تقاس بوحدة m

t تقاس بوحدة s

v_i تقاس بوحدة m/s

a تقاس بوحدة m/s^2

بالتعويض عن وحدات كل متغير

$$d_f = \text{m} + \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)(\text{s}) + \frac{1}{2}\left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)(\text{s})^2$$

بسّط الكسور مستعملًا الخاصية التوزيعية

$$= \text{m} + (\text{m})\left(\frac{\text{s}}{\text{s}}\right) + \frac{1}{2}(\text{m})\left(\frac{\text{s}^2}{\text{s}^2}\right)$$

بالتعويض عن $\text{s/s} = 1$، $\text{s}^2/\text{s}^2 = 1$

$$= \text{m} + (\text{m})(1) + \frac{1}{2}(\text{m})(1)$$

جميع الحدود أعطت الوحدة m لذلك فإن d_f بوحدة m

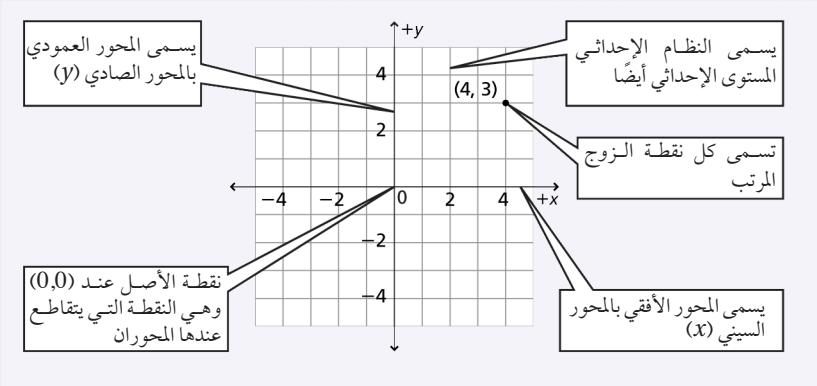
$$= \text{m} + \text{m} + \frac{1}{2}\text{m}$$

لا يطبّق المعامل $\frac{1}{2}$ في المعادلة أعلاه بالنسبة للوحدات، ويطبّق فقط لأي من القيم العددية التي يتم تعويضها بدلاً من المتغيرات لحل المعادلة. ومن السهل إزالة المعاملات الرقمية مثل الرقم $\frac{1}{2}$ عندما تبدأ بإجراء تحليل الوحدات.

IV. التمثيل البياني للعلاقات Graphs of Relations

المستوى الإحداثي (الديكارتي) The Coordinate Plane

تعين النقاط بالنسبة إلى خطين مدرّجين متعامدين يطلق على كل منهما اسم المحور، و يسمى خط الأعداد الأفقي المحور السيني (x). أما خط الأعداد العمودي فيسمى المحور الصادي (y). ويمثل المحور السيني عادة المتغير المستقل، فيما يمثل المحور العمودي المتغير التابع، بحيث تُمثّل النقطة بإحداثيين (x،y) يسميان أيضًا الزوج المرتب. وتَرد دائماً قيمة المتغير التابع (x) أولًا في الزوج المرتب الذي يمثل (0,0) نقطة الأصل، وهي النقطة التي يتقاطع عندها المحوران.

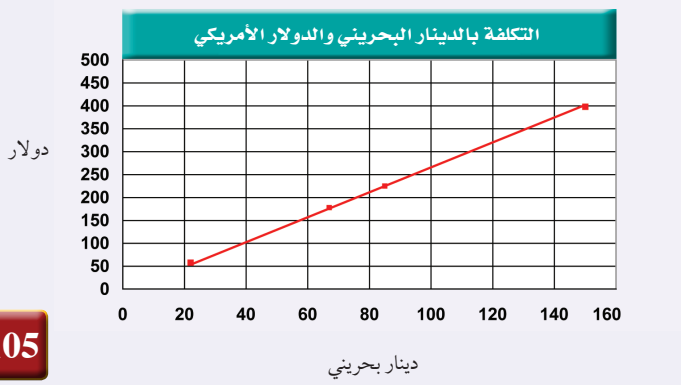


استعمال التمثيل البياني لتحديد العلاقة الرياضية Grahping Data to Determine Relationships

استعمل الخطوات الآتية لعمل رسوم بيانية:

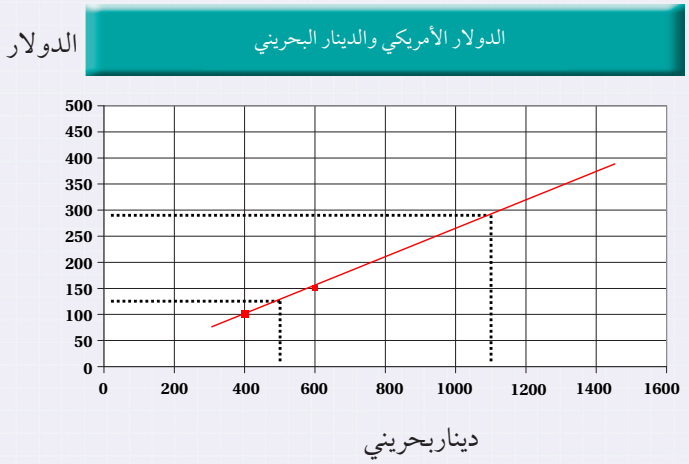
1. ارسم محورين متعامدين.
2. حدّد المتغيرات المستقلة والمتغيرات التابعة، وعيّن محور كل منهما مستعملًا أسماء المتغيرات.
3. عيّن مدى البيانات لكل متغير، لتحديد المقياس المناسب لكل محور، ثم حدّد ورقّم المقاييس.
4. عيّن كل نقطة بيانيًّا.
5. عندما تبدو لك البيانات واقعة على خط مستقيم واحد ارسم الخط الأكثر ملاءمة خلال مجموعة النقاط. وعندما لا تقع النقاط على خط واحد ارسم منحنى بيانيًّا بسيطًا، بحيث يمر بأكبر عدد ممكن من النقاط. وعندما لا يبدو هناك أي ميل لاتجاه معين فلا ترسم خطًّا أو منحنًى.
6. اكتب عنوانًا يصف بوضوح ماذا يمثل الرسم البياني.

نوع الخدمة	دينار	دولار
الفندق (الإقامة)	150	398
الوجبات	85	225
الترفيه	67	178
المواصلات	22	58



الاستيفاء والاستقراء Interpolating and Extrapolating

تستعمل طريقة الاستيفاء في تقدير قيمة تقع بين قيمتين معلومتين على الخط الممثل لعلاقة ما، في حين أن عملية تقدير قيمة تقع خارج مدى القيم المعلومة تسمى الاستقراء. إن معادلة الخط الممثل لعلاقة ما تساعدك في عمليتي الاستيفاء والاستقراء.



مثال: مستعينًا بالرسم البياني استعمل طريقة الاستيفاء لتقدير القيمة (السّعْر) المقابلة لـ 50 دينارًا.

حدد نقطتين على كل من جانبي القيمة 50 (40 دينارًا، 60 دينارًا)، ثم ارسم خطًّا مستمرًّا يصل بينهما.

ارسم الآن خطًّا متقطعًا عموديًّا من النقطة (50 دينارًا) على المحور الأفقي حتى يتقاطع مع الخط المرسوم، ثم ارسم من نقطة التقاطع خطًّا متقطعًا أفقيًّا يصل إلى المحور الرأسي. سوف تجد أنه يتقاطع معه عند القيمة 131 أو 132 دولارًا.

مثال: استعمل الاستقراء لتحديد القيمة المقابلة لـ 1100 دينار.

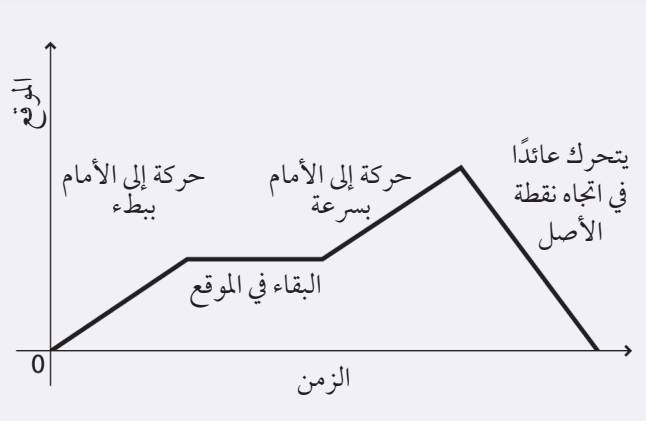
ارسم خطًّا متقطعًا من النقطة (1100 دينار) على المحور الأفقي حتى يتقاطع مع الخط المستمر الذي رسمته في المثال السابق، ثم ارسم من نقطة التقاطع خطًّا متقطعًا أفقيًّا. ستجد أنه يتقاطع مع المحور الرأسي عند النقطة 290 دولارًا.

تفسير الرسم البياني الخطي Interpreting Line Graph

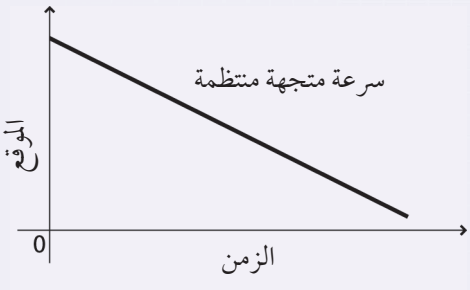
يوضح الرسم البياني الخطي العلاقة الخطية بين متغيرين. وهناك نوعان من الرسوم البيانية الخطية التي تصف الحركة تستخدم عادة في الفيزياء.

ارتباط الرياضيات مع الفيزياء

a. يوضح الرسم البياني علاقة خطية متغيرة بين (الموقع – الزمن).

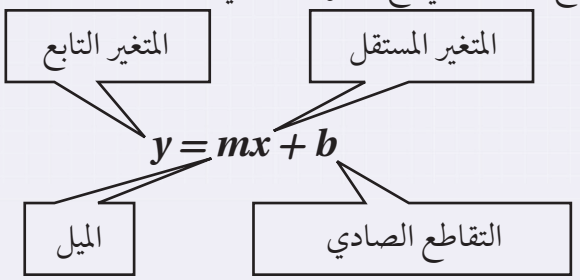


b. يوضح الخط البياني علاقة خطية ثابتة بين متغيرين (الموقع – الزمن)



المعادلة الخطية Linear Equation

يمكن كتابة المعادلة الخطية بالشكل: $y = mx + b$، حيث m ، b أعداد حقيقية، و(m) يمثل ميل الخط، و(b) يمثل التقاطع الصادي؛ وهي نقطة تقاطع الخط البياني مع المحور الصادي.



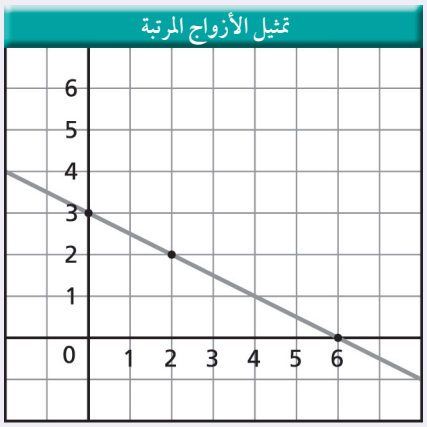
تمثل المعادلة الخطية بخط مستقيم، ولتمثيلها بيانيًّا قم باختيار ثلاث قيم للمتغير المستقل (يلزم نقطتان فقط، والنقطة الثالثة تستخدم لإجراء اختبار). احسب القيم المقابلة للمتغير التابع، ثم عيّن زوجين مرتبين (x, y)، وارسم أفضل خط يمر بجميع النقاط.

مثال: مثّل بيانيًّا المعادلة

$$y = -\left(\frac{1}{2}\right)x + 3$$

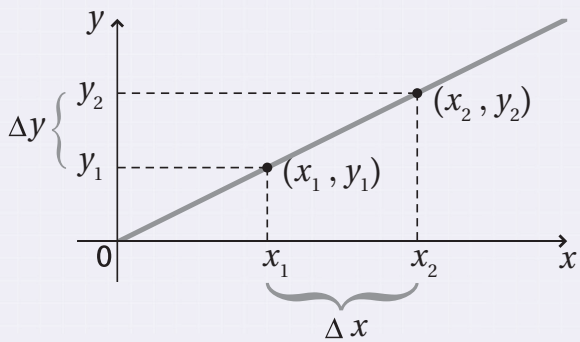
احسب ثلاثة أزواج مرتبة للحصول على نقاط لتعيينها.

الأزواج المرتبة	
x	y
0	3
2	2
6	0



الميل Slope

ميل الخط هو النسبة بين التغير في الإحداثيات الصادية، والتغير في الإحداثيات السينية، أو النسبة بين التغير العمودي (المقابل) والتغير الأفقي (المجاور). وهذا الرقم يخبرك بكيفية انحدار الخط البياني، ويمكن أن يكون رقمًا موجبًا أو سالبًا. ولإيجاد ميل الخط قم باختيار نقطتين (x_1 , y_1) ، (x_2 , y_2)، ثم احسب الاختلاف (الفرق) بين الإحداثيين السينيين $\Delta x = x_2 - x_1$، والاختلاف (الفرق) بين الإحداثيين الصاديين $\Delta y = (y_2 - y_1)$، ثم جد النسبة بين Δy و Δx .



$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

التغير الطردي Direct variation

إذا احتوت المعادلة على ثابتٍ غير صفري m، بحيث كانت $y = mx$، فإن y تتغير طرديًّا بتغير x؛ وهذا يعني أنه عندما يزداد المتغير المستقل x فإن المتغير التابع y يزداد أيضًا، ويقال عندئذٍ إن المتغيرين x و y يتناسبان تناسبًا طرديًّا. وهذه معادلة خطية على الصورة $y = mx + b$ حيث قيمة b صفر، ويمر الخط البياني من خلال نقطة الأصل $(0,0)$.

ارتباط الرياضيات مع الفيزياء في معادلة القوة المعيدة (المُرجعة) للنابض المثالي $F = -kx$ ، حيث F القوة المُرجعة، k ثابت النابض و x استطالة النابض، تتغير القوة المرجعة للنابض طرديًّا مع تغير استطالته؛ ولذلك تزداد القوة المرجعة عندما تزداد استطالة النابض.

التغير العكسي Inverse Variation

إذا احتوت المعادلة على ثابت غير صفري m، بحيث كانت $y=m/x$ ، فإن y تتغير عكسيًّا بتغير x ؛ وهذا يعني أنه عندما يزداد المتغير المستقل x فإن المتغير التابع y يتناقص، ويقال عندئذ إن المتغيرين x و y يتناسبان تناسبًا عكسيًّا. وهذه ليست معادلة خطية؛ لأنها تشتمل على حاصل ضرب متغيرين، والتمثيل البياني لعلاقة التناسب العكسي عبارة عن قطع زائد. ويمكن كتابة هذه العلاقة على الشكل:

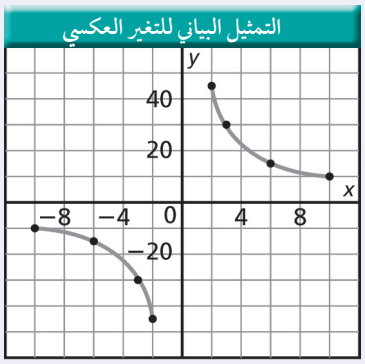
$$xy = m$$

$$y = m\frac{1}{x}$$

$$y = \frac{m}{x}$$

مثال: مثِّل المعادلة $xy = 90$ بيانيًّا

الأزواج المرتبة	
x	y
-10	-9
-6	-15
-3	-30
-2	-45
2	45
3	30
6	15
10	9



ارتباط الرياضيات مع الفيزياء في معادلة سرعة الموجة $\lambda = \frac{v}{f}$ ، حيث λ الطول الموجي، f التردد، و v سرعة الموجة، نجد أن الطول الموجي يتناسب عكسيًّا مع التردد؛ وهذا يعني أنه كلما يزداد تردد الموجة فإن الطول الموجي يتناقص، أما v فتبقى قيمتها ثابتة.

التمثيل البياني للمعادلة التربيعية Quadratic Graph

الصيغة العامة للعلاقة التربيعية هي:

$$y = ax^2 + bx + c$$

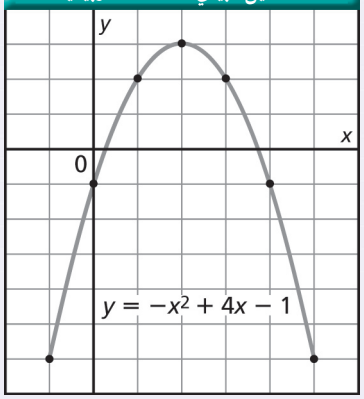
حيث $a \neq 0$

التمثيل البياني للعلاقة التربيعية يكون على صورة قطع مكافئ، ويعتمد اتجاه فتحة هذا القطع على معامل مربع المتغير المستقل(a)، إذا كان موجبًا أو سالبًا.

مثال: مثّل بيانيًّا المعادلة $y = -x^2 + 4x - 1$

الأزواج المرتبة	
x	y
−1	−6
0	−1
1	2
2	3
3	2
4	−1
5	−6

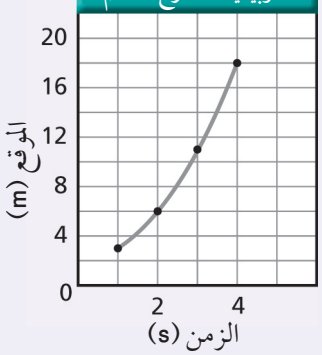
التمثيل البياني للمعادلة التربيعية



ارتباط الرياضيات مع الفيزياء عندما يكون منحنى (الموقع – الزمن) على شكل المنحنى البياني للمعادلة التربيعية فهذا يعني أن الجسم يتحرك بتسارع منتظم.

الأزواج المرتبة	
الموقع (m)	الزمن (s)
3	1
6	2
11	3
18	4

التمثيل البياني للمعادلة التربيعية للتسارع المنتظم



V. علم الهندسة والمثلثات (Geometry and Trigonometry)

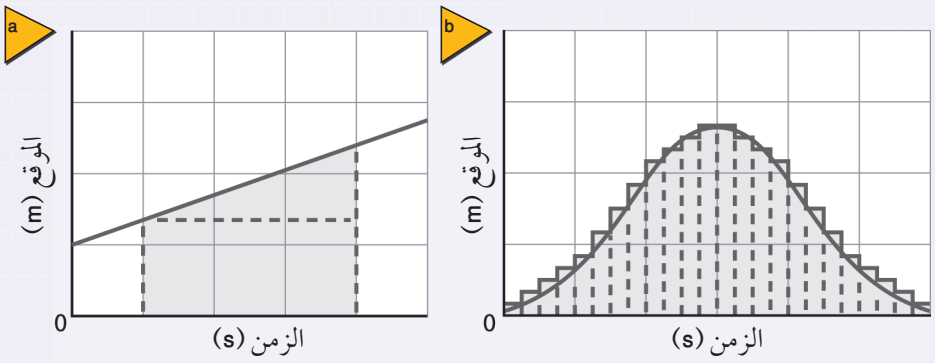
المحيط (Perimeter)، والمساحة (Area)، والحجم (Volume)

	المحيط وحدات خطية	المساحة وحدات مربعة	مساحة السطح وحدات مربعة	الحجم وحدات مكعبة
المربع الضلع a	$P = 4a$	$A = a^2$		
المستطيل الطول l العرض w	$P = 2l + 2w$	$A = lw$		
المثلث القاعدة b الارتفاع h		$A = (\frac{1}{2})\ bh$		
المكعب الضلع a			$SA = 6a^2$	$V = a^3$
الدائرة نصف القطر r	$C = 2\pi r$	$A = \pi r^2$		
الأسطوانة نصف القطر r الارتفاع h			$SA = 2\pi rh + 2\pi r^2$	$V = \pi r^2 h$
الكرة نصف القطر r			$SA = 4\pi r^2$	$V = (\frac{4}{3})\pi r^3$

ارتباط الرياضيات مع الفيزياء ابحث في مسائل الفيزياء التي درستها عن أشكال هندسية، يمكن أن تكون ثلاثية الأبعاد أو ذات بعدين. ويمكن أن تمثل الأشكال ذات البعدين السرعة المتجهة أو متجهات الموقع.

المساحة تحت المنحنى البياني Area Under a Graph

لحساب المساحة التقريبية الواقعة تحت المنحنى البياني، قسم المساحة إلى عدة أجزاء أصغر، ثم أوجد مساحة كل جزء مستعملًا الصيغ الرياضية في الجدول السابق. لإيجاد المساحة التقريبية الواقعة تحت الخط البياني، قسم المساحة إلى مستطيل ومثلث، كما هو موضح في الشكل a. ولإيجاد المساحة تحت المنحنى ارسم عدة مستطيلات من المحور السيني كما في الشكل b. إن رسم مستطيلات أكثر ذات قاعدة أصغر تمنحنا دقة أكثر في حساب المساحة المطلوبة.



المساحة الإجمالية تساوي
المساحة1 + المساحة 2 + المساحة 3 + ...

المساحة الإجمالية تساوي
مساحة المستطيل + مساحة المثلث

VI. اللوغاريتميات Logarithms

اللوغاريتميات للأساس b

افترض أن b و x عددان موجبان، بحيث $b \neq 1$. فإن لوغاريتم x للأساس b يكتب في صورة $(\log_b x)$ ويساوي y، حيث تمثل y الأس الذي يجعل المعادلة $x = b^y$ صحيحة. إن لوغاريتم x للأساس b يساوي العدد الأسي (y) الذي ترفع إليه العدد b للحصول على x.

$\log_b x = y$ إذا وفقط إذا $b^y = x$

مثال: أوجد ناتج كل من اللوغاريتمات التالية:

$\log_2 \frac{1}{16} = -4$ لأن $2^{-4} = \frac{1}{16}$

$\log_{10} 1000 = 3$ لأن $10^3 = 1000$

عندما تريد إيجاد لوغاريتم عددٍ ما يمكنك استعمال الآلة الحاسبة.

ارتباط الرياضيات مع الفيزياء يستعمل الفيزيائيون اللوغاريتمات للعمل بقياسات تمتد إلى مقادير متعددة القيمة أو القوة للعدد 10، ويستعمل الجيوفيزيائيون مقياس ريختر وهو مقياس لوغاريتمي يوفر لهم القدرة على تقدير معدل الزلازل من 5 إلى 7 أو أكبر، وتختلف قوة الزلازل بمقدار 7 أو بقوى أكبر للأساس 10.

اللوغاريتمات الطبيعية Common Logarithms

تسمى اللوغاريتمات للأساس 10 اللوغاريتمات الطبيعية، وتكتب غالبًا بدون الرقم الدليل 10.

$$\log_{10} x = \log x \qquad x > 0$$

المقابلات اللوغاريتمية أو معكوس اللوغاريتمات Antilogarithms or Inverse Logarithms

المقابل اللوغاريتمي هو معكوس اللوغاريتم، ويمثل العدد الذي له لوغاريتم.

مثال: حل $\log x = 4$ بالنسبة للمتغير x

$\log x = 4$

$x = 10^4$ — 10^4 هي المقابل اللوغاريتمي للعدد 4

ارتباط الرياضيات مع الفيزياء إن معادلة مستوى الصوت L، بوحدة الديسبل، هي $L = 10 \operatorname{Log}_{10} R$. حيث R الشدة النسبية للصوت. احسب R لشوكة رنانة تصدر صوتًا بمستوى صوت مقداره 130 ديسيبل.

$130 = 10 \operatorname{Log}_{10} R$ — قسّم طرفي المعادلة على العدد 10

$13 = \operatorname{Log}_{10} R$ — استعمل قاعدة اللوغاريتم

$R = 10^{13}$

عندما تعلم قيمة اللوغاريتم لعدد وتريد معرفة العدد نفسه يمكنك استعمال الآلة الحاسبة لإيجاد معكوس اللوغاريتم.

مسائل تدريبية

15. اكتب الصيغة الأسية للمعادلة $\operatorname{Log}_3 81 = 4$

16. اكتب الصيغة اللوغاريتمية للمعادلة $10^{-3} = 0.001$

17. إذا كان $\operatorname{Log} x = 3.125$، فأوجد قيمة x.

الوحدات الأساسية SI		
الكمية	الاسم	الرمز
الطول	meter	m
الكتلة	kilogram	kg
الزمن	second	s
درجة الحرارة	kelvin	K
مقدار المادة	mole	mol
التيار الكهربائي	ampere	A
شدة الإضاءة	candela	cd

وحدات SI المشتقة				
د	الوحدة	الرمز	معبرة بالوحدات الأساسية	معبرة بوحدات SI أخرى
التسارع		m/s^2	m/s^2	
المساحة		m^2	m^2	
الكثافة		kg/m^3	kg/m^3	
الشغل، الطاقة	joul	J	$kg.m^2/s^2$	N.m
القوة	newton	N	$kg.m/s^2$	
القدرة	watt	W	$kg.m^2/s^3$	J/s
الضغط	bascal	Pa	$kg/m.s^2$	N/m^2
السرعة		m/s	m/s	
الحجم		m^3	m^3	

تحويلات مفيدة		
1 in = 2.54 cm	$1kg = 6.02 \times 10^{26}$ u	1 atm = 101 kPa
1 mi = 1.61 km	1 oz ↔ 28.4 g	1 cal = 4.184 J
	1 kg ↔ 2.21 lb	$1ev = 1.60 \times 10^{-19}$ J
1 gal = 3.79 L	1 lb = 4.45 N	1kwh = 3.60 MJ
$1 m^3 = 264$ gal	1 atm = 14.7 lb/in^2	1 hp = 746 W
	$1atm = 1.01 \times 10^5 N/m^2$	$1 mol= 6.022 \times 10^{23}$

ثوابت فيزيائية			
الكمية	الرمز	المقدار	القيمة التقريبية
وحدة كتلة الذرة	u	$1.66053886\times 10^{-27}$ kg	1.66×10^{-27} kg
عدد أفوجادرو	N_A	6.0221415×10^{23} mol^{-1}	6.022×10^{23} mol^{-1}
ثابت بولتزمان	k	1.3806505×10^{-23} $Pa.m^3/K$	1.38×10^{-23} $Pa.m^3/K$
ثابت الغاز	R	8.314472 $Pa.m^3/mol.K$	8.31 $Pa.m^3/mol.K$
ثابت الجاذبية	G	6.6742×10^{-11} $N.m^2/kg^2$	6.67×10^{-11} $N.m^2/kg^2$

البادئات		
البادئة	الرمز	الدلالة العلمية
femto	f	10^{-15}
baico	p	10^{-12}
nano	n	10^{-9}
micro	µ	10^{-6}
mile	m	10^{-3}
cm	c	10^{-2}
disa	d	10^{-1}
dica	da	10^{1}
hecto	h	10^{2}
kilo	k	10^{3}
mega	M	10^{6}
giga	G	10^{9}
terra	T	10^{12}
beta	P	10^{15}

كثافة بعض المواد الشائعة	
المادة	الكثافة (g/cm^3)
ألومنيوم	2.702
كادميوم	8.642
نحاس	8.92
جرمانيوم	5.35
ذهب	19.31
هيدروجين	8.99×10^{-5}
إنديوم	7.30
حديد	7.86
رصاص	11.34
زئبق	13.546
أكسجين	1.429×10^{-3}
سليكون	2.33
فضة	10.5
ماء (4 C°)	1.000
خارصين	7.14

درجات الانصهار والغليان لبعض المواد		
المادة	درجة الانصهار (C°)	درجة الغليان (C°)
ألومنيوم	660.37	2467
نحاس	1083	2567
جرمانيوم	937.4	2830
ذهب	1064.43	2808
إنديوم	156.61	2080
حديد	1535	2750
رصاص	327.5	1740
سيليكون	1410	2355
فضة	961.93	2212
ماء	0.000	100.000
خارصين	419.58	907

السعة الحرارية النوعية لبعض المواد الشائعة			
	الحرارة النوعية (J/kg.K)	المادة	الحرارة النوعية (J/kg.K)
ألومنيوم	897	رصاص	130
نحاس أصفر	376	ميثانول	2450
كربون	710	فضة	235
نحاس	385	بخار	2020
زجاج	840	ماء	4180
جليد	2060	خارصين	388
حديد	450		

الحرارة الكامنة للانصهار وحرارة التبخر لبعض المواد الشائعة		
المادة	حرارة الانصهار (J/kg)	حرارة التبخر (J/kg)
نحاس	2.05×10^5	5.07×10^6
ذهب	6.30×10^4	1.64×10^6
حديد	2.66×10^5	6.29×10^6
رصاص	2.04×10^4	8.64×10^5
زئبق	1.15×10^4	2.72×10^5
ميثانول	1.09×10^5	8.78×10^5
فضة	1.04×10^5	2.36×10^6
ماء (جليد)	3.34×10^5	2.26×10^6

الأطوال الموجية للضوء المرئي	
الطول الموجي (nm) بالنانومتر	اللون
380–430	الضوء البنفسجي
430–450	الضوء النيلي
450–500	الضوء الأزرق
500–520	الضوء الأزرق الداكن
520–565	الضوء الأخضر
565–590	الضوء الأصفر
590–625	الضوء البرتقالي
625–740	الضوء الأحمر

الكتلة الذرية لبعض العناصر	
العنصر	الكتلة الذرية g/mol
نحاس	63.54
فضة	107.87
ذهب	196.97
ألومنيوم	26.98
رصاص	207.2
سيليكون	28.09

سرعة الصوت في أوساط مختلفة	
الوسط	m/s
هواء (0°)	331
هواء (20°)	343
هيليوم (0°)	972
هيدروجين (0°)	1286
ماء (25°)	1493
ماء البحر (0°)	1533
مطاط	1600
نحاس (25°)	3560
حديد (25°)	5130
زجاج التنور	5640
ألماس	12000

أ

انبعاث ألفا Alpha Decay **عملية اضمحلال إشعاعي ينبعث فيها جسيم ألفا من النواة.**

انبعاث بيتا Beta Decay **عملية اضمحلال إشعاعي يتحول فيها نيوترون إلى بروتون يبقى في النواة وجسيم بيتا وأنتي نيوترينو.**

انبعاث جاما Gamma Decay **عملية اضمحلال إشعاعي يتم فيها إعادة توزيع الطاقة داخل النواة، لكن دون تغير في العدد الكتلي أو مقدار الشحنة.**

اقتران الشغل Work Function **الطاقة اللازمة لتحرير الإلكترون الأضعف ارتباطًا بالذرة.**

الانبعاث المستثار Stimulated Emission **عملية تحدث عندما يصطدم فوتون طاقته تساوي الفرق بين طاقتي مستوى الإثارة وطاقة مستوى الاستقرار بذرة مثارة، فتعود الذرة الى حالة الاستقرار، وينبعث فوتون طاقته تساوي الفرق بين طاقتي المستويين.**

إنتاج الزوج Pair Production **تحوّل الطاقة إلى جسيمات مزدوجة "مادة وضديد المادة".**

الاندماج النووي Fusion **عملية يتم فيها اندماج أنوية صغيرة لإنتاج نواة أكبر وتحرير طاقة.**

الانشطار النووي Fission **العملية التي تنقسم فيها النواة إلى نواتين أو أكثر و نيوترونات وطاقة.**

ت

التأثير الكهروضوئي Photoelectric Effect انبعاث إلكترونات من سطوح الفلزات عند سقوط إشعاع كهرومغناطيسي مناسب عليها.

تأثير كومبتون Compton Effect الإزاحة في طاقة الفوتونات المشتتة.

تردد العتبة Threshold Frequency أقل تردد للأشعة الساقطة يمكنها تحرير الكترونات من العنصر.

التفاعل المتسلسل Chain Reaction عملية مستمرة ومتكررة من تفاعلات الانشطار سببها تحرير نيوترونات من تفاعل الانشطار الأول.

التفاعل النووي Nuclear Reaction عملية تحدث عندما يتغير عدد النيوترونات أو عدد البروتونات في النواة. وقد تحدث عندما تقذف النواة بأشعة جاما، أو بروتونات، أو نيوترونات، أوجسيمات الفا ، أو إلكترونات.

ج

جسيمات ألفا Alpha Particles جسيمات موجبة الشحنة وثقيلة، وتتحرك بسرعات عالية، ويرمز لها بالرمز.

ح

حالة الإثارة Excited State أي مستوى طاقة للذرة أعلى من مستوى الاستقرار.

حالة الاستقرار Ground State حالة الذرة عندما تمتلك أقل مقدارمسموح به من الطاقة.

حاملات القوة Force Carriers جسيمات تنقل أو تحمل القوى في المادة.

س

السحابة الإلكترونية Electron Cloud المنطقة ذات الاحتمالية العالية لوجود الإلكترون فيها.

ض

الضوء المترابط Coherent Light ضوء من مصدرين أو أكثر، يولد موجة ذات مقدمات منتظمة. أو موجات ضوء تكون متطابقة عند القمم والقيعان.

الضوء غير المترابط Incoherent Light ضوء بمقدمات موجية غير متزامنة تضيء الأجسام بضوء أبيض منتظم. أو هو ضوء يتكون من موجات مختلفة في الطور، قممها وقيعانها غير متوافقة.

ط

طاقة الربط النووية Binding Energy الطاقة المكافئة لنقص كتلة النواة، وهي دائما سالبة.

طول موجة دي برولي De Broglie Wavelength طول الموجة الملازمة للجسم أو الجسيم المتحرك.

طيف الامتصاص Absorption Spectrum مجموعة مميزة من الاطوال الموجية، تنتج عند امتصاص الغاز جزء من الطيف، وتستخدم للتعرف على نوع الغاز.

طيف انبعاث Emission Spectrum ضوء ينبعث من الأجسام الساخنة والمتوهجة في نطاق محدد من الترددات.

ع

العدد الذري Atomic Number عدد البروتونات في نواة العنصر.

العدد الكتلي Mass Number عدد البروتونات والنيوترونات داخل نواة العنصر.

عدد الكم **الرئيس** Principal Quantum Number العدد الصحيح n الذي يحدد القيم المكماة لنصف القطر أو الطاقة لمستوى (مدار) الالكترون _ يتضاعف نصف القطر عندما يتضاعف مربع n بينما تعتمد الطاقة على مقلوب n^2.

عمر النصف Half – Life الفترة الزمنية اللازمة لاضمحلال نصف أي كمية معطاة من ذرات نظير عنصر مشع.

ف

الفوتون Photon حزمة مكماة منفصلة من الإشعاع الكهرومغناطيسي، ليس له كتلة سكونية، ويتحرك بسرعة الضوء، وله طاقة وكمية تحرك.

ق

القوة النووية الضعيفة Weak Nuclear Force قوة ضعيفة داخل النواة تؤثر في انبعاث بيتا.

القوة النووية القوية Strong Nuclear Force قوة كبيرة جدًا تربط مكونات النواة، وهي نفس القوة بين البروتونات والبروتونات، أو بين البروتونات والنيوترونات، أو بين النيوترونات والنيوترونات.

ك

الكواركات Quarks جسيمات صغيرة تكوّن البروتونات والنيوترونات والبيونات.

ل

الليبتونات Leptons مجموعة من الجسيمات تكوّن الالكترونات والنيوترينات.

ليزر Laser ضوء موحد مترابط متفق في الطور يستخدم لإثارة ذرات أخرى، وينتج عن طريق الإنبعاث المحفز بالإشعاع.

م

مبدأ عدم التحديد Uncertainty Principle ينص على أنه لا يمكن تحديد موقع جسيم وزخمه بدقة عالية، في اللحظة نفسها.

مستوى الطاقة Energy Level كمات محددة من الطاقة توجد في كل مستوى للذرة.

مكمّاة Quantized الطاقة الموجودة في حزمة محددة.

المواد المشعة Radioactive المواد التي تنبعث منها إشعاعات تلقائيًا، وهذه الإشعاعات لها قدرة على النفاذ.

ميكانيكا الكم Quantum Mechanics دراسة خصائص المادة باستخدام خصائصها الموجية.

ن

النشاطية Activity معدل الاضمحلال، أو عدد إنحلالات المادة المشعة كل ثانية.

نقص الكتلة Mass Defect الفرق بين مجموع كتل مكونات النواة منفردة، والكتلة الفعلية لها.

النموذج الكمي Quantum Model نموذج يتوقع احتمالية وجود الإلكترون في منطقة محددة فقط.

النموذج المعياري Standard Model نموذج بناء وحدات المادة، تتوزع فيه الجزيئات على ثلاث عائلات هي الكواركات، واللبتونات، وحاملات القوة.

النويدة (نواة النظير) Nuclide جزء صغير جدًا في مركز الذرة، موجب الشحنة، وتتركز فيه معظم كتلة الذرة.

النيوكليونات Nucleons مسمى يطلق على البروتونات والنيوترونات.

و

وحدة الكتل الذرية Atomic Mass Unit وحدة كتلة u ،وتعرف بأنها $\frac{1}{12}$ كتلة نظير الكربون $^{12}_{6}C$ حيث u تساوي 1.66×10^{-27} kg

الجدول الدوري للعناصر

فلز
شبه فلز
لا فلز

يدل لون صندوق كل عنصر على ما إذا كان فلزًّا أو شبه فلز أو لافلزًّا.

10	11	12	13	14	15	16	17	18
								Helium 2 He 4.003
			Boron 5 B 10.811	Carbon 6 C 12.011	Nitrogen 7 N 14.007	Oxygen 8 O 15.999	Fluorine 9 F 18.998	Neon 10 Ne 20.180
			Aluminum 13 Al 26.982	Silicon 14 Si 28.086	Phosphorus 15 P 30.974	Sulfur 16 S 32.065	Chlorine 17 Cl 35.453	Argon 18 Ar 39.948
Nickel 28 Ni 58.693	Copper 29 Cu 63.546	Zinc 30 Zn 65.409	Gallium 31 Ga 69.723	Germanium 32 Ge 72.64	Arsenic 33 As 74.922	Selenium 34 Se 78.96	Bromine 35 Br 79.904	Krypton 36 Kr 83.798
Palladium 46 Pd 106.42	Silver 47 Ag 107.868	Cadmium 48 Cd 112.411	Indium 49 In 114.818	Tin 50 Sn 118.710	Antimony 51 Sb 121.760	Tellurium 52 Te 127.60	Iodine 53 I 126.904	Xenon 54 Xe 131.293
Platinum 78 Pt 195.078	Gold 79 Au 196.967	Mercury 80 Hg 200.59	Thallium 81 Tl 204.383	Lead 82 Pb 207.2	Bismuth 83 Bi 208.980	Polonium 84 Po (209)	Astatine 85 At (210)	Radon 86 Rn (222)
Darmstadtium 110 Ds (281)	Roentgenium 111 Rg (272)	Copernicium * 112 Cn (285)	Nihonium * 113 Nh (284)	Flerovium * 114 Fl (289)	Moscovium * 115 Mc (288)	Livermorium * 116 Lv (291)	Tennessine * 117 Ts (288)	Oganesson * 118 Og (294)

* أسماء رموز العناصر 112، 113، 114، 115، 116، 118 تم اختيار الأسماء النهائية بعد التأكد من اكتشافها حديثًا.

Europium 63 Eu 151.964	Gadolinium 64 Gd 157.25	Terbium 65 Tb 158.925	Dysprosium 66 Dy 162.500	Holmium 67 Ho 164.930	Erbium 68 Er 167.259	Thulium 69 Tm 168.934	Ytterbium 70 Yb 173.04	Lutetium 71 Lu 174.967
Americium 95 Am (243)	Curium 96 Cm (247)	Berkelium 97 Bk (247)	Californium 98 Cf (251)	Einsteinium 99 Es (252)	Fermium 100 Fm (257)	Mendelevium 101 Md (258)	Nobelium 102 No (259)	Lawrencium 103 Lr (262)

العناصر في كل عمود تدعى مجموعة، ولها خواص كيميائية متشابهة.

غاز
سائل
صلب
مُصنع

العنصر
العدد الذري
الرمز
الكتلة الذرية المتوسطة

Hydrogen
1
H
1.008

الرموز الثلاثة العليا تدل على حالة العنصر في درجة حرارة الغرفة. بينما يدل الرمز الرابع على العناصر المصنعة.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Hydrogen 1 H 1.008								
2	Lithium 3 Li 6.941	Beryllium 4 Be 9.012							
3	Sodium 11 Na 22.990	Magnesium 12 Mg 24.305							
4	Potassium 19 K 39.098	Calcium 20 Ca 40.078	Scandium 21 Sc 44.956	Titanium 22 Ti 47.867	Vanadium 23 V 50.942	Chromium 24 Cr 51.996	Manganese 25 Mn 54.938	Iron 26 Fe 55.845	Cobalt 27 Co 58.933
5	Rubidium 37 Rb 85.468	Strontium 38 Sr 87.62	Yttrium 39 Y 88.906	Zirconium 40 Zr 91.224	Niobium 41 Nb 92.906	Molybdenum 42 Mo 95.94	Technetium 43 Tc (98)	Ruthenium 44 Ru 101.07	Rhodium 45 Rh 102.906
6	Cesium 55 Cs 132.905	Barium 56 Ba 137.327	Lanthanum 57 La 138.906	Hafnium 72 Hf 178.49	Tantalum 73 Ta 180.948	Tungsten 74 W 183.84	Rhenium 75 Re 186.207	Osmium 76 Os 190.23	Iridium 77 Ir 192.217
7	Francium 87 Fr (223)	Radium 88 Ra (226)	Actinium 89 Ac (227)	Rutherfordium 104 Rf (261)	Dubnium 105 Db (262)	Seaborgium 106 Sg (266)	Bohrium 107 Bh (264)	Hassium 108 Hs (277)	Meitnerium 109 Mt (268)

صفوف العناصر الأفقية تدعى دورات. يزداد العدد الذري من اليسار إلى اليمين في كل دورة.

الرقم المحاط بقوسين هو العدد الكتلي للنظير الأطول عمرًا للعنصر.

سلسلة اللانثانيدات	Cerium 58 Ce 140.116	Praseodymium 59 Pr 140.908	Neodymium 60 Nd 144.24	Promethium 61 Pm (145)	Samarium 62 Sm 150.36
سلسلة الأكتنيدات	Thorium 90 Th 232.038	Protactinium 91 Pa 231.036	Uranium 92 U 238.029	Neptunium 93 Np (237)	Plutonium 94 Pu (244)

يدل السهم على المكان الذي يجب أن توضع فيه هذه العناصر في الجدول. لقد تم نقلها إلى أسفل الجدول توفيراً للمكان.

التعليم
مستقبل البحرين